

VERBETERING VEILIGHEIDSBENADERING: INTEGRALE BEVINDINGEN



RAPPORT

2024
18

VERBETERING VEILIGHEIDSBENADERING: INTEGRALE BEVINDINGEN

RAPPORT

2024

18

ISBN 978.94.6479.049.8



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Henk van Hemert (STOWA)

MET DANK AAN

De begeleidingsgroep Visie
De Begeleidingsgroep Techniek
De werkgroep veiligheidsbenadering
De expertgroep geotechniek

VORMGEVING Buro Vormvast

STOWA STOWA 2024 18

ISBN 978.94.6479.049.8

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

In de vierde periode van het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen (ORK-IV) zijn een aantal onderzoeken en pilots over de veiligheidsbenadering uitgevoerd. Alle uitkomsten hiervan zijn in dit rapport gebundeld en voorzien van een visie op het vervolg. Dit rapport vormt de basis voor verdere studies die in ORK-V zullen worden opgepakt.

Het bezwijken van de dijk bij Wilnis in 2003 heeft grote invloed gehad op het veiligheidsdenken over de regionale keringen. Het ORK werd gestart en vanaf 2006 werden alle regionale keringen aangewezen en genormeerd. Inmiddels zijn deze keringen getoetst en veelal versterkt. Het streven is dat rond 2030 de veiligheid van de regionale keringen zo veel mogelijk op orde is.

In de afgelopen twintig jaar is veel geleerd en ook geconstateerd dat de huidige veiligheidsbenadering op onderdelen verbeterd kan worden. Daarom wordt in het ORK onderzocht welke onderdelen van de veiligheidsbenadering anders aangepakt kunnen worden. Daarmee zal het ORK bijdragen aan een betere veiligheidsbenadering in de toekomst.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

VOORWOORD

In de afgelopen jaren is in het kader van het Ontwikkelprogramma Regionale Keringen (ORK-IV) met het onderwerp ‘veiligheidsbenadering’ veel gebeurd. Vergelijkingen met de overstromingskansbenadering voor primaire keringen zijn gemaakt en enkele verbeteringen van de vigerende overschrijdingskansbenadering zijn benoemd en in diverse pilot studies onderzocht. Gedurende deze periode is geregeld afstemming geweest met de begeleidingsgroep Techniek en Visie van ORK-IV, over de voortgang, inhoudelijke punten en vragen over de toekomstige implementatie van beschouwde aanpassingen van de methode. Het algemene beeld is dat de vigerende overschrijdingskansbenadering op zichzelf nog voldoet. De benadering wordt landelijk toegepast, en de toetsmethode daarbij is de laatste jaren goed aangepast; vooral ten aanzien van de toepasbaarheid daarvan. Echter, op onderdelen is een verdere verbetering van de methode gewenst.

Bij de pilots ontstonden veel verdiepvragen over de werking van de berekeningssystematiek en de herleidbaarheid van de uitslagen. Uiteindelijk bleef de vraag over waar nu het grote voordeel zit om deze methodiek grootschalig te gaan gebruiken. Gedurende de uitwerking werd steeds duidelijker dat, ondanks de nauwe betrokkenheid van de begeleidingsgroepen, veel deelnemers de systematiek nog steeds te onduidelijk vinden voor een weloverwogen advies over de onderzochte verbeteringen. De conclusie van beide begeleidingsgroepen is dan ook dat het nog te vroeg is om een besluit te nemen over de verbetering van de toetsmethode. Dit vanuit de ervaring dat de overschrijdingskansbenadering op dit moment de geen urgente aanpassing vereist. Enige verbeteringen zijn wel wenselijk, maar men kan met deze benadering de komende jaren nog goed verder. De komende jaren kunnen zodoende worden benut om de overstromingskansbenadering geschikt te maken voor de regionale keringen en haar verschillende watersystemen. Het is goed dit samen in alle rust aan te gaan pakken, onder begeleiding van STOWA en zonder een strakke planning van dwingende bestuurlijke afspraken.

De studies hebben de aandacht gevestigd op kansrijke alternatieve methoden voor de toets op veiligheid. Een goed voorbeeld hiervan is een eenvoudige methode voor het meenemen van “bewezen sterkte” in combinatie met het monitoren van aantastingen en passend binnen initiatieven tot een continu inzicht in de toestand van de keringen binnen de zorgplicht. Dit is kansrijk voor met name keringen met een evident kleine faalkans (op basis van toetsresultaten of dankzij recente versterking) en/of boezem- en kanaalkaden met een lage norm (=dagelijks optredende bijna-normbelasting). Dergelijk eenvoudige methodieken verkleinen de benodigde inspanning voor de toets op veiligheid. Bijkomstig voordeel is dat zo meer aandacht wordt gegeven aan (en waardering komt) voor het meten & monitoren, het inspecteren en onderhouden van de keringen, in plaats van het periodiek toetsen. Ook deze ontwikkelingen zijn de opbrengst van de inspanningen in ORK-4.

Door de waterschappen zijn de regionale keringen volop getoetst en wordt gewerkt aan diverse verbeteringsprogramma's. Het belang van de regionale keringen wordt binnen een waterschap afgewogen tegen de grote belangen van de primaire keringen. Juist bij de primaire keringen is de opgave fors toegenomen. Maar ook andere taakvelden van de waterschappen vergen toenemende aandacht. Zo komen er nieuwe (zwaardere) normen voor waterkwantiteit en waterkwaliteit en moeten de waterzuiveringen bijvoorbeeld rond 2040 aan

zwaardere normen voldoen. De waterschappen krijgen dus een verzwaring van hun taken. In dit krachtenveld neemt de druk op de regionale keringen toe, terwijl aantastingen van de keringen door invloed van het klimaat (droogte, langdurige zware buien) en maaiveld daling niet afnemen. De waterschappen zullen de komende jaren juist voortvarend met de toets- en verbeterwerkzaamheden door moeten gaan. Dit vergt beschikbaarheid van menskracht en budgetten. Ook vanuit de maatschappelijke context is het uitstel van aanpassing van de veiligheidsbenadering acceptabel. Pas wanneer de diverse lopende verbeterprogramma's op hun einde lopen ontstaat een goed moment om een aanpassing van de methodiek te overwegen. Een methodiek die tegen die tijd goed kan zijn uitgewerkt, met aansprekende uitgewerkte voorbeelden.

SAMENVATTING

CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Sinds de start van de aanwijzing en normering van regionale keringen vanaf 2006 zijn alle regionale keringen inmiddels getoetst en veel daarvan versterkt. Streven is dat rond 2030 de veiligheid van de regionale keringen zo veel mogelijk op orde is, waartoe veel geld geïnvesteerd wordt in kadeverbeteringen. Onder andere door de introductie van de overstromingskansbenadering bij de primaire keringen ontstond de discussie over de veiligheidsbenadering voor de regionale keringen. Conclusie is dat een specifieke regionale veiligheidsbenadering wenselijk is die recht doet aan de aard van en verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen. De stuurgroep van het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen (ORK)¹ gaf daarom de opdracht een aantal verbetermogelijkheden van de huidige veiligheidsbenadering verder uit te werken.

Enkele verbetermogelijkheden zijn in een aantal pilots onderzocht. Hierbij is geconcludeerd dat zowel de normeringsmethodiek als de toetsmethodiek verbeterd kan worden. De verbetering van de normeringsmethodiek zijn duidelijk:

1. Uniformering van de te beschouwen gevolgen en de te hanteren schadefuncties en -bedragen. Hierdoor kunnen de overstromingsgevolgen eenduidiger bepaald worden;
2. Bij de bepaling van de gevolgen nadrukkelijk aandacht hebben voor:
 - a. Getroffenen en eventuele slachtoffers;
 - b. De mogelijkheid om met nood- of beheersmaatregelen de gevolgen te beperken;
3. Ruimte geven voor het normeren op basis van kosten – baten analyses, met name voor die situaties waarin de kosten (of baten) van waterveiligheid sterk afwijken van de landelijk gemiddelde situatie waarop de IPO-tabel is gebaseerd.

Hoewel de beste manier voor verbetering van de toetsmethodiek nog niet geheel duidelijk is, staat wel vast dat de relatie tussen de norm en de wijze waarop geverifieerd wordt of aan die norm wordt voldaan dient te worden verbeterd. De onderzochte aanpassingen (werkwijzen) hebben nog niet tot definitieve conclusies geleid. Verder onderzoek naar verbetering van de toetsmethodiek wordt aanbevolen.

De voorgestelde aanpassingen van de normeringsmethodiek kunnen in 2024 definitief worden uitgewerkt, voor vaststelling in 2025. De gewenste aanpassingen van de toetsmethodiek zijn nog niet voldragen. Aanpassing is ook niet urgent, gezien de lopende versterkingsprogramma's is introductie pas rond 2030-2034 wenselijk. De komende jaren kunnen worden benut voor verdere uitwerking van de mogelijke verbeteringen.

¹ Het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen is 2005 gestart. De vierde fase van het ORK liep van 2020 tot 2024. Inmiddels is fase vijf gestart.

OVERWEGINGEN

Bij de uitwerking van de verbetering van de veiligheidsbenadering, in ORK-V, gelden de volgende overwegingen.

Toetsen ondersteunt de besluitvorming tot investeren in dijkversterking

Doel van een toetsing is vooral de verificatie of een gebied het maatschappelijk gewenste beschermingsniveau heeft. Hieruit kan geconcludeerd worden of een dijkversterking nodig is en eventueel in welke volgorde de projecten kunnen worden uitgevoerd. Verder levert de toetsing inzicht in de zwakke plekken, wat nuttig is voor de beheer- en calamiteitenorganisatie.

Een realistisch beeld van de waterveiligheid is benodigd

De veiligheidsbenadering moet resulteren in een zo realistisch mogelijk beeld van de waterveiligheid, onnodig hoge normen en het onnodig afkeuren dient te worden voorkomen (het onterecht goedkeuren is evenzo onwenselijk). Alleen op basis van een realistisch beeld kunnen de juiste investeringsbeslissingen worden genomen.

Toepasbaarheid 'primaire' systematiek voor regionale keringen vergt nog aandacht

Toepassing van de werkwijze en instrumenten uit de overstromingskansbenadering voor de primaire keringen voor de beoordeling van regionale keringen leidt niet tot een eenduidig en reproduceerbaar resultaat. Bovendien zijn hoge berekende overstromingskansen denkbaar. Voor een onomstreden aanpassing van de veiligheidsbenadering is een plausibel resultaat belangrijk. Juist omdat regionale keringen frequent of zelfs permanent worden belast zullen hoge berekende overstromingskansen de geloofwaardigheid van de methode aantasten.

Van optreden faalmechanisme tot overstroming

Binnen de huidige overschrijdingskans benadering wordt per dijkvak getoetst of het voldoende zeker is dat de afzonderlijke faalmechanismen niet zullen optreden tijdens een maatgevende situatie. Daarbij wordt veelal geen rekening gehouden met de onzekerheden in de maatgevende (combinatie van) belastingen en evenmin met de vraag of het optreden van het betreffende mechanisme wel leidt tot een overstroming. Binnen de overstromingskans benadering wordt wel rekening gehouden met de vraag of het optreden van een mechanisme daadwerkelijk in een overstroming resulteert. Daartoe wordt rekening gehouden met de kansen op het optreden van combinaties van belastingen, en het verloop van het volledige faalpad. In dat opzicht kan de toetsing op basis van de overstromingskansbenadering worden gezien op een verfijning van de toetsing volgens de vigerende overschrijdingskansbenadering (voor wat betreft het benaderen van de faalkans van een dwarsprofiel).

Verskil toets- en ontwerpmethodiek

Duidelijk is dat de overstromingskansbenadering een directe vergelijking mogelijk maakt met de maximaal acceptabele kans op een overstroming die volgt uit de normering met de norm. Het is echter ook duidelijk, dat in het kader van het robuust ontwerpen en Life Cycle Costing (LCC)² overwegingen, niet exact op de overstromingskans zal worden ontworpen, maar op het niet (frequent) optreden van de verschillende mechanismen leidend tot schade (= onderhoudskosten), ook al leiden die niet tot een overstroming. In zekere zin wordt hiermee invulling gegeven aan één van de conclusies uit de pilots, namelijk dat een robuust ontwerp (waar dat eenvoudig kan) doelmatig is. Dit is een belangrijk verschil tussen toetsen en ontwerpen, een optimale toetsmethodiek is dan ook niet per definitie een optimale ontwerpmethodiek.

2 Life cycle costing is een methodiek voor het in beeld brengen van alle kosten van een kering; investeringskosten, beheers- en onderhoudskosten en «sloopkosten» gedurende de levensduur van de kering.

VISIE VERVOLG EN AANBEVELINGEN

Gezien deze overwegingen is het wenselijk om de introductie van (componenten uit) de overstromingskansbenadering voor de toetsing van de regionale keringen verder te verkennen. Uitgangspunt daarbij zou moeten zijn dat de overstromingskans wordt benaderd door het combineren van de faalkansen per doorsnede per faalmechanismen tot de overstromingskans van een gebied.

Het hergebruik van eerdere toetsresultaten moet eenvoudig mogelijk zijn, hiervoor dienen eenvoudig toepasbare werkwijzen of handreikingen te worden opgesteld, om een reproduceerbaar en plausibel resultaat te behalen tegen een passende inspanning. Te denken valt aan een eenvoudige werkwijze voor het rekening houden met bewezen sterkte, de afleiding van het lengte-effect en het filteren van evident veilige dwarsdoorsneden.

Verder blijft het wenselijk om, in aanvulling op de integrale overstromingskans op traject- / gebiedsniveau, het inzicht in de conditionele kansen op de afzonderlijke mechanismen te behouden, bijvoorbeeld ten behoeve van de calamiteitenorganisatie tijdens extreme situaties. Tenslotte verdient het aanbeveling om gedurende de uitwerking van de aanpassingen in de komende jaren de beheerders met een 'voorlopige' werkwijze in staat te stellen voor lopende of geplande kadeversterkingen te verkennen of (veel) te veel of (veel) te weinig wordt versterkt.

DE STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt Stowa zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die Stowa beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van Stowa in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of gisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

VERBETERING VEILIGHEIDSBENADERING: INTEGRALE BEVINDINGEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	VOORWOORD	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Invulling veiligheidsbenadering	1
	1.2 Situatie regionale keringen	2
	1.3 Achtergrond uitgevoerd onderzoek	3
	1.4 Status deze notitie en vervolgproces	4
2	BEVINDINGEN AANPASSINGEN VEILIGHEIDSBENADERING: NORMEREN	5
	2.1 Inleiding	5
	2.2 Uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming	6
	2.3 Gevolgbeperkende maatregelen in het watersysteem of overstromde gebied	8
	2.4 Vertaling van de gevolgen in een norm	9
	2.5 Conclusie normeren	11
3	BEVINDINGEN AANPASSINGEN VEILIGHEIDSBENADERING: TOETSEN	12
	3.1 Inleiding	12
	3.2 Bevindingen	12
	3.3 Conclusie en aanbevelingen toetsmethodiek	14
4	AANDACHTSPUNTEN EN AANBEVELINGEN VERVOLGONDERZOEK	15

BIJLAGEN		17
BIJLAGE 1	RAPPORTAGE VOORBEELDUITWERKING	18
BIJLAGE 2	EINDRAPPORT - CONCLUSIES PILOTS VEILIGHEIDSBENADERING	104
BIJLAGE 3	EINDRAPPORT - BOUWSTENEN PILOTS VEILIGHEIDSBENADERING	122
BIJLAGE 4	GEVOLGEN_VEILIGHEIDSBENADERING_REG_KER_D1	158
BIJLAGE 5	PILOT BOEZEMKADE STEDELIJK	189
BIJLAGE 6	PILOT REGIONALE RIVIER LANDELIJK	251
BIJLAGE 7 A	PILOT BOEZEMKADE LANDELIJK	349
BIJLAGE 7 B	PILOT BOEZEMKADE LANDELIJK ANNEX VERKENNING GEDIFFERENTIEERD NORMEREN	441
BIJLAGE 8	PILOT REGIONALE RIVIER STEDELIJK	452
BIJLAGE 9	RAPPORTAGE GEBIEDSPILOT POLDER HEERHUGOWAARD	538
BIJLAGE 10	LIR EN ECONOMISCHE ONTWICHTING KAART	638
BIJLAGE 11	RAPPORT_REGIONALE_KERINGEN_20201116	639
BIJLAGE 12	20170421 MEDEDELING WWK VERKENNING BASISVEILIGHEID	660

1

INLEIDING

1.1 INVULLING VEILIGHEIDSBENADERING

Het doel van een veiligheidsbenadering, die bestaat uit een normering- en toetsmethode, is een methode voor het bepalen van een veiligheidsnorm voor gebieden tegen een overstroming en een methode om te toetsen of aan de gestelde norm wordt voldaan. Het stellen van normen (eisen) en het toetsen (verifiëren of aan de norm wordt voldaan) zijn middelen om weloverwogen besluiten te kunnen nemen tot kosteneffectieve investeringen in waterveiligheid. Voor een juiste investeringsbeslissing is het verkrijgen van een realistisch beeld van de veiligheid van groot belang.

Voor de invulling van de veiligheidsbenadering bestaan een aantal varianten, onderstaand beschreven.

Normering op basis van kosten-batenanalyse.

Het politiek/bestuurlijk gewenste veiligheidsniveau (de norm) wordt bepaald door enerzijds de grootte van het overstromingsrisico (kansen en gevolgen) en anderzijds de inspanning die geleverd moet worden om het overstromingsrisico te verkleinen. Deze balans is te evalueren met een kosten-batenanalyse. Het uitvoeren van een kosten-baten analyse voor de normering voor elke kering is echter een omvangrijke inspanning. In een kosten-baten analyse wordt zowel gekeken naar de investeringskosten als het risico (kansen en overstromingsgevolgen).

Normering op basis van een (maatschappelijk acceptabel) overstromingsrisico

Een eenvoudiger alternatief betreft het normeren van een maatschappelijk acceptabel risico op schade en eventueel slachtoffers. Bij een dergelijke normstelling kan, indien het risico te groot blijkt, worden overwogen om te investeren in maatregelen om de kans te verkleinen door dijkverbeteringen of de gevolgen te beperken door compartimentering, adaptatie, etc.^{3,4}. In een toetsing op basis van risiconormen wordt alleen gekeken naar overstromingskansen en -gevolgen en niet naar investeringskosten.

Normering op basis van een (maatschappelijk acceptabele) overstromingskansen

Een verder vereenvoudigd alternatief betreft het normeren van een (acceptabele) overstromingskansen, bepaald op basis van de berekende gevolgen van een overstroming en een (landelijk) maatschappelijk acceptabel schade- en slachtofferrisico. In een toetsing op basis van overstromingskansnormen wordt alleen gekeken naar overstromingskansen en niet naar investeringskosten of overstromingsgevolgen.

Normering op basis van een (maatschappelijk acceptabele) overschrijdingskansen

Tenslotte kan een genormeerde overstromingskansen worden vertaald naar een overschrijdingsfrequentie van een waterstand die voldoende veilig gekeerd moet kunnen worden. Dit betreft de overschrijdingskansbenadering, waarbij alleen naar overbelasting en niet naar het

3 Aandachtspunt daarbij is de verdeling van verantwoordelijkheden en bevoegdheden tussen de waterkeringbeheerder (maatregelen waterkeringen) en de ruimtelijke ontwikkelingen (o.a. gemeenten, provincie).

4 De kosten van de maatregelen worden bij deze variant niet meer (direct) meegenomen.

hele proces tot falen wordt gekeken (de zgn. overbelastingbenadering). In een toetsing op basis van een overschrijdingskans wordt per faalmechanisme en per vak gecontroleerd of de veiligheid van de kering bij de norm-conditie aan de afgeleide eisen voldoet⁵. Bij de afleiding van de eisen wordt uitgegaan van een dijkvakbenadering (geen lengte-effect) en een vaste faalkansverdeling over de mechanismen.

1.2 SITUATIE REGIONALE KERINGEN

Sinds de start van de aanwijzing en normering van regionale keringen vanaf 2006 zijn alle regionale keringen inmiddels getoetst, en veel ook zo nodig versterkt. Streven is dat in 2030 de veiligheid van de regionale keringen zo veel mogelijk op orde is. Daartoe wordt veel geld geïnvesteerd in de verbetering van regionale keringen.

Bij de introductie van de overstromingskansbenadering voor de primaire keringen richtte de aandacht zich ook op de regionale keringen. Dat begon met de vraag of het falen tot onaanvaardbare waarden van het LIR (Lokaal Individueel Risico) zou kunnen leiden. Dat bleek voor een beperkt aantal locaties en in beperkte mate het geval [zie bijlage 12]. Ook bleek dat het falen van regionale waterkeringen op enkele locaties kan leiden tot substantiële schade aan vitale en kwetsbare infrastructuur, met bovenregionale of landelijke maatschappelijke ontwrichting tot gevolg [B10]. Mede daardoor ontstond discussie over de veiligheidsbenadering voor de regionale keringen.

Na een inventarisatie van de sterke en zwakke punten van zowel de overschrijdings- als overstromingskansbenadering is geconcludeerd dat een specifieke regionale benadering wenselijk is. Een benadering die recht doet aan de aard van en verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen.

Belangrijk aandachtspunt daarbij is dat de kans op een overstroming van een beschermd gebied niet per definitie gelijk is aan de kans op het overschrijden van de (hydraulische) belasting behorende bij de norm. Zodoende wordt volgens de huidige toetsmethode de kans op een daadwerkelijke overstroming van een gebied onvoldoende vastgesteld. Dit komt doordat:

- een waterkering niet onmiddellijk faalt bij een waterstand (iets) boven de toetswaterstand, terwijl het ook mogelijk is dat de waterkering bij een (iets) lagere waterstand faalt;
- een beschermd gebied overstroomt bij het falen van één enkel vak van het waterkeringsstelsel. Met de samenhang tussen het falen van de verschillende vakken van het waterkeringsstelsel wordt daarbij geen rekening gehouden.

De inschatting van de daadwerkelijke kans op een overstroming en de bepaling van de gevolgen van een overstroming zijn essentiële factoren in de maatschappelijke discussie over het acceptabele (schade-) risico en de afweging van kosten en baten voor waterveiligheid. Op basis van deze constatering zijn een viertal denkbare verbeteringen van de overschrijdingskansbenadering geselecteerd. Dit betreft de volgende punten:

4. Bepaling gevolgen: een landelijk uniforme toekenning van normen vergt het consequent beschouwen van alle (significante) gevolgen van een overstroming, zoals bovenregionale effecten, indirecte schaden, schade door stremming scheepvaart en water aan- en afvoer, het aantal getroffen en eventueel zelfs slachtoffers, etc..

⁵ Voldoet: de standzekerheid van het kadevak is voldoende zeker

5. Watersysteem maatregelen: kunnen, in het kader van de normering, nood- of beheersmaatregelen in het watersysteem worden meegenomen bij de bepaling van de gevolgen?
6. Medegebruik en beheer & onderhoud: kunnen eisen uit het medegebruik van de waterkering maatgevend zijn?
7. Relatie tussen de genormeerde overstromingskans van een gebied en eisen aan de waterkering: op welke wijze kan worden beoordeeld of de sterkte van de kering voldoet aan de genormeerde overstromingskans voor een gebied.

Aanvullend is in het kader van het onderzoek naar de normering aandacht besteed aan het rekening houden met de benodigde kosten om de keringen die het overstroombare gebied beschermen aan de veiligheidsnorm te laten voldoen.

Om bovenstaande punten te onderzoeken zijn in de afgelopen jaren pilot studies uitgevoerd voor 4 verschillende regionale watersysteemsituaties:

- Boezemkade – landelijk: kade langs een boezem die een landelijk gebied beschermd;
- Boezemkade – stedelijk: kade langs een boezem die een stedelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – landelijk: kering langs een regionale rivier die een landelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – stedelijk: kering langs een regionale rivier die een stedelijk gebied beschermd.

In de 4 pilots is nader ingegaan op:

- normeren:
 - uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming, zowel binnen als buiten het overstroomde gebied;
 - rekening houden met maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
 - de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses);
- toetsen:
 - werkwijzen voor de toetsing.

Bij de analyse van de bevindingen is aandacht besteed aan zowel de voor- en nadelen in termen van de betrouwbaarheid van de methode als aan de uitvoerbaarheid (benodigde tijd, geld en middelen).

1.3 ACHTERGROND UITGEVOERD ONDERZOEK

In het volgende hoofdstuk wordt allereerst een algemene introductie gegeven op de uitgevoerde onderzoeken en worden achtereenvolgens de conclusies van de onderzoeksvragen samengevat en aanbevelingen voor aanpassingen van de veiligheidsbenadering beschreven. De rapportages van de diverse studies die in het kader van de studie zijn uitgevoerd, zijn als bijlagen beschikbaar (zie tabel 1).

TABEL 1

STRUCTUUR RAPPORTAGE VEILIGHEIDSBENADERING

Integrale notitie	
A	Verbetering veiligheidsbenadering: integrale bevindingen. Studies in ORK-IV uitgevoerd, als bijlage toegevoegd in dit rapport
B1	Veiligheidsbenadering regionale keringen. Voorbeelduitwerking overstromingskansbenadering - impact analyse.
B2	Veiligheidsbenadering regionale keringen. Integrale conclusies van de pilots.
B3	Veiligheidsbenadering regionale keringen. Bouwstenenrapport.
B4	Gevolgen verbetering veiligheids-benadering regionale keringen - Consequentie analyse.
B5	Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot boezemkade – stedelijk
B6	Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot rivier – landelijk
B7	Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot boezemkade – landelijk
B8	Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot rivier – stedelijk
B9	Herbeschouwing veiligheidsbenadering regionale waterkeringen. Rapportage gebiedspilot polder Heerhugowaard
B10	Verkenning Basisveiligheid en Economische Ontwrichting in Relatie tot het Regionale Systeem - kaart
B11	Overschrijdingskans – Overstromingskans regionale keringen Technische vergelijking tussen de overschrijdingskans en overstromingskans
B12	Verkenning mogelijke impact falen regionale waterkeringen op het LIR en maatschappelijke ontwrichting - WWK Studies in ORK-III uitgevoerd en als separaat rapport uitgebracht
C1	Overstromingsrisico Regionale Keringen, Rapport 2015-26
C2	Handelingsperspectieven om te komen tot een waterrobuust Zwolle in het watersysteem van de Sallandse Weteringen, Rapport 2020-10
C3	Veiligheidsbenadering Regionale Keringen, Casus Groote of Achterwaterschap – Alblasserwaard Vijfherenlanden, Rapport 2021-06
C4	Overschrijdingskans overstromingskans Regionale Keringen, Rapport 2021-07

1.4 STATUS DEZE NOTITIE EN VERVOLGPROCES

Deze notitie is een samenvatting van de bevindingen van de pilots en de conclusies van de discussies met de begeleidingsgroepen Techniek en Visie van het Ontwikkelprogramma Regionale Keringen (ORK). Deze notitie vormde de onderbouwing van een advies aan de Stuurgroep ORK, op basis waarvan de Stuurgroep heeft besloten om de voorgestelde aanpassingen van de normeringsmethodiek in 2024 definitief uit te laten werken en het onderzoek naar verbetering van de toetsmethodiek te vervolgen.

Voordat een definitief besluit genomen wordt over de verbetering van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen, zal deze worden voorgelegd aan de werkgroep Waterkeringen van de UvW, het IPO-vakberaad, het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en voor consultatie voorgelegd aan het ENW. Doel daarbij is enerzijds draagvlak voor het besluit alsmede afstemming over de verdere invulling van de verbeteringen.

2

BEVINDINGEN AANPASSINGEN

VEILIGHEIDSBENADERING: NORMEREN

2.1 INLEIDING

In de huidige normeringsmethode wordt bestuurlijk een norm gekozen op basis van de berekende gevolgen in het overstroomde gebied en een geaccepteerd schaderisico. Daarbij wordt vaak rekening gehouden met overige consequenties van een overstroming, zoals het functioneren van het boezemsysteem of stremming scheepvaart. Dergelijke overige consequenties zijn echter niet gespecificeerd. Eveneens wordt het treffen van gevolgbeperkende maatregelen niet beschouwd, net zoals de daadwerkelijke, lokale baten en de kosten van een dijkversterking.

Hiervoor is onderzoek gedaan om bovenstaande te verbeteren in de huidige methodiek. De onderzochte verbeteringen van de veiligheidsbenadering betreffen:

1. het consequent beschouwen van alle gevolgen van een overstroming;
2. maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
3. de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses).

Ad.1 Het betreft hier gevolgen zoals bovenregionale effecten, indirecte schaden, schade door stremming scheepvaart en water aan- en afvoer, het aantal getroffen en eventueel zelfs slachtoffers, etc., zowel binnen het overstroomde gebied als daarbuiten. Voor een consistente normering is een landelijke uniforme bepaling van de gevolgen van een overstroming van belang, zowel wat betreft de beschouwde gevolgen als de berekende grootte daarvan en de te beschouwen gebieden die (in potentie) gevolgen ondervinden van een overstroming. Daarbij moet tevens worden aangegeven op welke wijze de gevolgen uitgedrukt kunnen worden, kwantitatief of meer kwalitatief.

In de volgende paragrafen worden de bevindingen samengevat, met achtereenvolgens de onderdelen:

- uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming;
- gevolg beperkende maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied;
- de vertaling van de berekende gevolgen in een norm.

2.2 UNIFORME BESCHOUWING VAN DE GEVOLGEN VAN EEN OVERSTROMING

Achtereenvolgens de uitvoering van de overstromingsberekeningen en de bepaling van de gevolgen.

Ten aanzien van de **overstromingsberekeningen** is geconstateerd dat:

- Een overstromingskansberekening kan op verschillende detailniveaus worden gemaakt, waarbij de benodigde inspanning (gegevens, tijd, kosten) toeneemt met het detailniveau. Uitersten zijn daarbij enerzijds de projectie van toetspeil in het beschermde gebied, het 'badkuipmodel' (eenvoudig), en anderzijds een volledig tijdsafhankelijke berekening van het verloop van de overstroming (complex).
- Een overstroming vanuit het regionale watersysteem resulteert soms in beperkte waterdiepten. De berekening van het verloop van de overstroming is daardoor gevoelig voor de nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens (zoals maaiveldniveau's en de aanwezigheid van sloten) en de gekozen uitgangspunten (zoals de standzekerheid van bijvoorbeeld weglichamen).
- Voor polders in een boezemstelsel geldt dat de omvang van de gevolgen van een overstroming weinig afhankelijk zijn van de overschrijdingsfrequentie van de situatie op het boezemstelsel. Dit komt door het geringe verschil in waterstanden (-volumen) en het betrekkelijk vlakke maaiveldniveau in een polder. Alleen indien verhoogde lijnelementen in de polder aanwezig zijn, is een discontinue ontwikkeling van de schade denkbaar.
- De omvang en grootte van de gevolgen van een overstroming van beschermde gebieden langs regionale rivieren nemen toe bij extremere herhalingstijden. De mate waarin is afhankelijk van de decimeringshoogte van de waterstand op de rivier, de breslocatie (beneden- of bovenstrooms van het gebied) en het reliëf in het gebied. In het kader van normering dienen de gevolgen bij verschillende overschrijdingsfrequenties van de waterstand / afvoer te worden beschouwd.

Ten aanzien van de bepaling van de **gevolgen** is geconstateerd dat:

- een divers scala aan gevolgen is denkbaar, zowel in het overstroomde gebied als in aanliggende gebieden en aan het watersysteem, waarbij het zowel directe als indirecte gevolgen kunnen betreffen;
- de gevolgen voor het watersysteem of gebieden buiten het overstroomde gebied kunnen significant (= van invloed op de normklasse) zijn;
 - niet alle typen gevolgen zijn goed te kapitaliseren, sommigen typen gevolgen laten zich slecht kapitaliseren, het is beter deze kwalitatief te benoemen;
 - bij een overstroming uit het regionale watersysteem bestaat in sommige situaties kans op slachtoffers, maar verdisconteerd via het LIR en groepsrisico zijn slachtoffers niet maatgevend gebleken voor de normering.
 - de beschikbare methoden voor de bepaling van de schade (het HIS-SSM en de Waterschadeschatter⁶) resulteren in verschillende schadebedragen, die kunnen leiden tot verschillende normklassen;
 - het aantal ontheemden/getroffenen (niet slachtoffers) kan een relevant aspect zijn bij het vaststellen van de normstelling.

⁶ HIS-SSM en de WaterSchadeSchatter zijn hulpmiddelen waarmee de verwachte schade ten gevolge van een overstroming in een gebied kan worden berekend, waarbij HIS-SSM ook het verwachte aantal slachtoffers schat.

Overwegingen:

- Een specifiek slachtofferrisico voor een regionale overstroming lijkt weinig relevant, maar slachtoffers blijken niet uitgesloten. Zodoende dient wel aandacht te zijn voor de kans op slachtoffers. Zo mogelijk alleen indien op voorhand een significant aantal slachtoffers valt te verwachten, om te voorkomen dat standaard een gedetailleerde overstromingsberekening nodig is.
- Het is zeer onwaarschijnlijk dat het zgn. groepsrisico maatgevend wordt voor de normering van regionale keringen (ten opzichte van de economische schade);
- Gedetailleerde overstromingsberekeningen geven inzicht in het verloop van de overstroming (patroon, aankomsttijd, waterdiepten) en de ontwikkeling van de schade gedurende de overstroming. Met dit inzicht kan het nut van gevolgbeperkende maatregelen worden bepaald en de slagingskans van het succesvol toepassen daarvan worden ingeschat.
- Een gedetailleerde overstromingsberekening vergt een forse inspanning. Indien een lage norm evident lijkt (geen significante kans op slachtoffers en weinig schade) heeft een hoog detailniveau geen toegevoegde waarde uit oogpunt van de resulterende norm.

AANBEVELINGEN

Beschouw bovenregionale effecten, indirecte schaden en schade aan het watersysteem

Deze gevolgen kunnen relatief groot zijn ten opzichte van de (directe) schade in het overstroomde gebied, aanbevolen wordt deze te betrekken bij de normering. Voor een uniforme uitwerking dient een standaard lijst met te beschouwen gevolgen te worden gehanteerd. Een overzicht met de categorieën gevolgen die beschouwd moeten worden, gespecificeerd naar gebied, inclusief een wijze waarop de gevolgen bepaald moeten worden (in euro's / kwantitatief of kwalitatief) is beschreven in bijlage 3. Een van 'grof waar het kan naar fijn waar het moet' aanpak wordt voorgesteld, waarbij indirecte schaden en schade aan het watersysteem alleen in detail gekwantificeerd worden als deze relevant zijn voor de norm.

Standaard methode voor gevolgbepalings

Voor de landelijk uniforme bepaling van de schade moet een standaard methode worden gegeven, waarbij een mogelijkheid tot maatwerk blijft bestaan. De twee beschikbare methoden voor schadebepaling, HIS-SSM en Waterschadeschatter, leiden tot significant verschillende schadebedragen. Voor een uniforme bepaling dient een universele werkwijze te worden ontwikkeld, of de lokaal meest geschikte methode te worden voorgeschreven op basis van de kenmerken van de overstroming (m.n. waterdiepte).

Aandacht voor getroffen en slachtoffers

Het aantal getroffen en eventueel zelfs de kans op slachtoffers verdient aandacht. Daarvoor wordt een gefaseerde aanpak voorgesteld, waarbij eerst kwalitatief wordt vastgesteld of een significant aantal (*aantal nader te bepalen*) slachtoffers mogelijk is. Verificatie van het LIR is alleen zinvol als verwacht wordt dat de mortaliteit (=kans op overlijden per locatie in het getroffen gebied) ergens hoog zal zijn. Voorgesteld wordt om uit te gaan van het maximale LIR van 10^{-5} per jaar en de methode voor de bepaling van het LIR die bij de primaire keringen wordt gehanteerd. Pas bij gebleken relevantie kan het aantal slachtoffers worden bepaald aan de hand van (meer complexe) overstromingsberekeningen.

Een optelling met het LIR door een overstroming vanuit buitenwater is nog een overweging.

2.3 GEVOLGBEPERKENDE MAATREGELEN IN HET WATERSYSTEEM OF OVERSTROOMDE GEBIED

Constateringen:

- Noodmaatregelen in het watersysteem en het beschermde gebied kunnen van grote invloed zijn op de resulterende gevolgen.
- Een overstromingsberekening inclusief de ontwikkeling van de schade in de tijd geeft een duidelijk inzicht in de beschikbare reactietijd voor het treffen van noodmaatregelen, en info zoals aankomsttijd, waterdiepte en stroomsnelheid voor het bepalen van de passende maatregelen op de juiste locatie.
- De snelheid waarmee de schade ontstaat tijdens een overstroming verschilt sterk per pilot, en is sterk afhankelijk van de lokale situatie voor wat betreft enerzijds het watersysteem (aanvoer van water) en anderzijds het reliëf in het overstroomde gebied. Speciaal de aanwezigheid van verhoogde lijnelementen is van invloed, indien deze een compartimenterende functie kunnen vervullen.
- Het generieke beeld voor (vlakke) polders is dat het compartimenteren (of dichten van een bres) snel dient te worden uitgevoerd, omdat een groot deel van de schade al betrekkelijk snel (= bij een geringe waterdiepte) ontstaat;
- Maatregelen in het watersysteem om tijdens een overstroming van uit een regionale rivier de gevolgen nog te beperken zijn weinig kansrijk, omdat:
 - het omleiden van het water of het inzetten van extra gemaalcapaciteit niet van toepassing zijn;
 - voor het compartimenteren (= afdammen) dient het afvoerdebit (ad hoc) lokaal bovenstrooms geborgen te worden, wat een weinig realistische maatregel lijkt.
- Maatregelen in het watersysteem om tijdens een overstroming vanuit een boezemstelsel (door compartimenteren) de gevolgen nog te beperken zijn kansrijk, mits de aanvoer beperkt is en het compartimenteren snel uitvoerbaar is.
- Tijdelijke (nood-) maatregelen in het beschermde gebied kunnen de gevolgen aanzienlijk beperken, omdat dankzij de veelal beperkte waterdiepte het verloop van de overstroming enigszins te beheersen is.
- Logistieke / praktische informatie (kentallen) voor het kunnen bepalen of een noodmaatregel getroffen kan worden is beschikbaar ([wiki noodmaatregelen v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Hoofdpagina](https://wiki.noodmaatregelen.v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Hoofdpagina)).

Overwegingen:

- Specifiek voor compartimenterende maatregelen geldt dat rekening moet worden gehouden met eventuele nadelige invloeden van deze maatregelen. Denk hierbij aan schade aan de buitentaluds bij een snelle val van de waterstand binnen het compartiment of stremming van de water aan- en afvoer. Bij de inzet van deze maatregelen moeten de bijbehorende negatieve gevolgen (schade) worden meegewogen bij de normering.
- Gevolgbeperkende (nood-) maatregelen kunnen een significante reductie van de gevolgen geven, wat leidt tot een lagere vereiste veiligheidsnorm. Het is daarom nuttig om rekening te houden met de inzet van dergelijke maatregelen.
- Vanwege de kwetsbaarheid voor de succesvolle toepassing van noodmaatregelen valt te overwegen om deze maatregelen wel mee te nemen bij de bepaling van de toetsnorm, maar bij een noodzakelijke dijkverbetering de inzet van dergelijke maatregelen niet mee te nemen (= strengere ontwerpnorm).
- Voor de bepaling van de betrouwbaarheid van de succesvolle toepassing van deze maatregelen wordt een kwalitatieve beoordeling aanbevolen. Voor zo'n beoordeling zijn voldoende gegevens te verkrijgen uit de overstromingsberekeningen en de haalbaarheid van de uitvoering van de maatregel.

Aanbevelingen:

1. Maatregelen die de gevolgen beperken dienen meegenomen te mogen worden, zowel maatregelen in het watersysteem (om de instroom te beperken) als in het getroffen gebied (om kwetsbare gebieden te beschermen).
2. De haalbaarheid van deze maatregelen dient verantwoord te worden, waarbij het niet nodig is om een gedetailleerde onderbouwing van de betrouwbaarheid te geven, maar nadrukkelijk wel aandacht moet zijn voor de haalbaarheid van het treffen van maatregelen op grote schaal. De werkwijze van zo'n verantwoording wordt niet voorgeschreven. De uitwerking is steeds maatregel- en locatiespecifiek, en de verantwoording zal in overleg tussen waterkeringbeheerder en provincie moeten worden vastgesteld.
3. Gevolgbeperkende maatregelen in het watersysteem kunnen nadelige effecten hebben, zoals (extra) schade aan de buitentaluds door een snelle (-re) val waterstand in het compartiment of langdurige stremming van een scheepvaartfunctie of de wateraan- / -afvoer. Zodoende moet met deze effectenrekening worden gehouden bij de bepaling van de gevolgen cq. de normering.

2.4 VERTALING VAN DE GEVOLGEN IN EEN NORM

Constateringen:

- De bepaling van de (toets-) norm per polder / gebied op basis van een gebied specifieke kosten-baten analyse is methodisch uitvoerbaar maar vergt een aanzienlijke inspanning.
- De normering op basis van een (te) gedetailleerde kosten baten – analyse kan tot lokaal onbevredigende uitkomsten leiden (bestuurlijk, qua uitlegbaarheid)⁷.
- Uit een kosten-baten analyse volgt een groot verschil tussen een economisch optimale toetsnorm en een economisch optimale ontwerpnorm.
- De aantallen slachtoffers en het LIR zijn in de pilots niet maatgevend gebleken voor het vereiste veiligheidsniveau (NB afgeleid op basis van criteria voor de primaire keringen).
- De eisen uit oogpunt van waterveiligheid en eisen vanuit medegebruik – functies kunnen niet eenvoudig worden vergeleken, vanwege verschillende veiligheidsbenaderingen. Het is denkbaar dat eisen uit oogpunt van medegebruik maatgevend kunnen zijn (m.n. vervormingen), maar het is niet mogelijk om te stellen dat een kering aan de veiligheidseisen zal voldoen omdat aan eisen uit oogpunt van medegebruik wordt voldaan.

Overwegingen:

- Ten aanzien van alternatieve vormen van normeren geldt dat:
 - normeren van een overstromingsrisico verdeelt verantwoordelijkheden over verschillende overheden (waterschap: kansen; gemeenten & provincies: gevolgen), wat als onwenselijk is beoordeeld;
 - normeren op basis van enkel de gevolgen past niet bij een (M-) KBA-gedachte in de normstelling, maar het introduceren van een gebied specifieke kosten-baten analyse voor de normering van regionale keringen vergt een aanzienlijke inspanning.
- De investeringskosten voor het verkleinen van het overstromingsrisico verschilt per type kering / gebied. Het hanteren van een landelijk standaard waarde voor de investeringskosten, en daarmee voor het economisch acceptabele schaderisico, doet geen recht aan deze verschillen, en kan leiden tot een onjuiste normstelling (strikt uit oogpunt van kosten-baten verhouding).
- De beschouwing van de investeringskosten bij de normering kan worden verbeterd door voor enkele typen keringen een specifieke kostenfunctie af te leiden, en op basis van de

⁷ Voor een gebied beschermd door een kering met een weg op de kruin resulteert dan een lagere norm dan eenzelfde gebied met de weg achter de kering, omdat door de aanwezigheid van de weg de versterkingskosten hoger zullen zijn.

berekende gevolgen daarmee de eis aan de overstromingskans (norm) vast te stellen. De kans op een onjuiste normstelling wordt zo sterk worden verkleind.

- In alle pilots is een significant verschil tussen een economisch optimale toetsnorm en ontwerpnorm aangetoond. Dit significante verschil komt doordat de meerkosten voor een sterke verkleining van de overstromingskans veelal (zeer) klein is. Oorzaken hiervoor zijn:
 - Voor veel regionale keringen is het verschil in de vereiste afmeting maar beperkt afhankelijk is van de norm, omdat de decimeringshoogte van de waterstand klein is (tot bijna verwaarloosbaar: boezem- en kanaalkaden).
 - Voor sommige regionale keringen zijn de kosten voor versterken relatief beperkt ten opzichte van de terugkerende kosten voor onderhoud (m.n. in laag NL, door maaiveld-daling, etc.).
 - De belasting (hydraulisch en verkeer) zijn vaak nauwelijks afhankelijk is van de grootte van de terugkeertijd van de belasting door o.a. maalstop en verkeersbeperkingen.
 - Alleen indien door ruimtegebrek een kostbare versterkingsmaatregel noodzakelijk is, heeft de norm een grotere invloed op de investeringskosten.
- Eventuele maatgevende eisen aan de kering volgend uit medegebruik dienen niet te worden meegewogen bij de normstelling van de kering uit oogpunt waterveiligheid. Dergelijke eisen zijn een consequentie van het medegebruik, en dienen te worden beschouwd binnen de beoordeling van de geschiktheid van de kering voor het betreffende medegebruik.
- Vanuit het streven naar een optimale balans tussen investeringskosten en risico dienen de uitkomsten van een beoordeling geloofwaardig te zijn. Dit vormt een pleidooi voor een zorgvuldige normering en het realistisch toetsen, ten behoeve van juiste investeringsbeslissingen.
- Ingrepen in het watersysteem of het overstroomde gebied kunnen significante invloed hebben op de gevolgen en dus op de optimale normstelling. De kosteneffectiviteit van deze maatregelen kan (n een KBA binnen de overstromingskansbenadering beter worden gemaakt dan binnen de overschrijdingskansbenadering. Belangrijke voorwaarde is dan wel dat die berekende overstromingskans een realistische kans is. Te conservatieve uitgangspunten (= hoge faalkans) kunnen in dergelijke KBA leiden tot een verkeerde / onnodige investering in de waterveiligheid.
- Indirecte schaden dienen niet (allemaal) noodzakelijkerwijs in Euro's te worden uitgedrukt, bijvoorbeeld omdat (uitgangspunten bij) de schadeberekening arbitrair kunnen zijn of omdat goede kostenfuncties ontbreken. Een opsomming van dergelijke gevolgen, zo nodig inclusief een kwalitatieve indicatie van de impact, volstaat om met deze gevolgen rekening te kunnen houden bij de (bestuurlijke) besluitvorming tot de normering.
- Bij het falen van een kering cq. overstroom van een gebied kan de ernst van een hoogwater-situatie in het watersysteem significant zijn afgenomen. Het los beschouwen van kades kan dus leiden tot overschatting van het risico en kan daarmee tot een te strenge norm leiden.
- De normering blijft een bestuurlijke keuze. De resultaten van KBA's of daarvan afgeleide tabellen, waarin normen worden gerelateerd aan gevolgschades, geven alleen een indicatie. Er is ruimte aanwezig om met kwalitatieve gevolgen en overige overwegingen rekening te houden.

Aanbevelingen:

1. handhaaf het uitdrukken van de norm in een (acceptabele) overstromingskans van een gebied;
2. omwille van de uniformiteit is handhaving van een vaste relatie tussen de gevolgen en de (toets-) norm, onderverdeeld in normklassen, wenselijk;
3. de relatie tussen het maatschappelijk acceptabele schaderisico en de investeringskosten verdient nadere aandacht, bijvoorbeeld via de mogelijkheid tot differentiatie daarvan naar (enkele) typen keringen en de lengte van de kering om het beschermd gebied;
4. met gevolgbeperkende maatregelen in het watersysteem of beschermd gebied kan rekening gehouden worden, bijvoorbeeld indien een scherpe afkeurgrens gewenst is. Bij een kadeverbetering moet de normering kunnen worden aangepast, bijvoorbeeld om de noodzaak tot (niet-permanente) gevolgbeperkende maatregelen te kunnen laten vervallen.
5. de betrouwbaarheid van de inzet van niet-permanente gevolgbeperkende maatregelen moet kwalitatief aannemelijk gemaakt worden in het kader van een verantwoordingsplicht. Een kwantitatieve analyse van de betrouwbare inzet moet geen verplichting zijn.
6. bij de normering moet nadrukkelijk ruimte zijn voor het afleiden van een (toets-) norm op basis van een locatiespecifieke kosten-baten analyse.
7. de vaststelling van de norm blijft een bestuurlijke keuze, waarbij de relatie met de gevolgen de economische onderbouwing vormt en niet-monetaire gevolgen en andere bestuurlijke en maatschappelijke overwegingen worden meegewogen.

2.5 CONCLUSIE NORMEREN

In het onderzoek naar de normstelling is geen duidelijke aanleiding gevonden om af te stappen van normen aan het waterkerend vermogen van regionale keringen, bijvoorbeeld door de introductie van risiconormen of het gebruik van lokale KBA-uitkomsten. Wel zijn diverse verbeterpunten naar voren gekomen:

- uniformering van de bepaling van overstromingsgevolgen, waartoe een voorstel voor te beschouwen gevolgen (in Euro's of kwalitatief) en beïnvloedde gebieden is opgesteld
- opstellen van een specifieke methode voor bepaling gevolgschade⁸;
- het kunnen meenemen van gevolgbeperkende maatregelen bij het vaststellen van normen;
- het actualiseren en aanbrengen van differentiatie in de normeringstabellen.

⁸ Als integratie van HIS-SSM en de WaterSchadeSchatter

3

BEVINDINGEN AANPASSINGEN

VEILIGHEIDSBENADERING: TOETSEN

3.1 INLEIDING

De relatie tussen het gewenste beschermingsniveau van een gebied en de wijze waarop wordt geverifieerd of de sterkte van de waterkering daaraan voldoet kan worden verbeterd. In de huidige benadering is het gewenste beschermingsniveau vertaald in de eis dat de kering een waterstand met een bepaalde genormeerde overschrijdingskans veilig kan keren. Een geringe overschrijding van die waterstand leidt echter niet per definitie direct tot een overstroming. Evenzogoed kan bij een waterstand net onder de norm (hoogte, stabiliteit) ook een overstroming plaats vinden. Bovendien leiden bij permanent waterkerende keringen sommige vormen van aantasting tot een grotere afname van de stabiliteitsfactor dan een toename van de belasting (STOWA studie 'toetsen op degradatie'). In de pilots zijn verschillende methodes beschouwd voor de wijze waarop kan worden beoordeeld of de sterkte van de kering voldoet aan een maximale overstromingskans voor een gebied.

3.2 BEVINDINGEN

Constateringen:

- Voor het verifiëren van de betrouwbaarheid van regionale keringen bestaan verschillende methodes. De geschiktheid van de methodes hangt af van de situatie en dan met name van de norm en van de variatie in de waterstand. Situaties met een milde norm en geringe variatie in de waterstand (= frequent optredende bijna-normatieve omstandigheden) bieden kansen voor eenvoudige beoordelingsmethoden.
- De methodisch 'perfecte' toetsprocedure - als tijd, geld en capaciteit er niet toe zouden doen - is een volledig probabilistische benadering waarbij voor alle denkbare belasting-situaties en de verschillende faalmechanismen voor alle doorsneden faalkansen worden bepaald. Deze worden vervolgens, rekening houdend met onderlinge correlaties, gecombineerd tot een totale faalkans voor het hele tracé. Deze totale faalkans wordt vergeleken met de maximaal toelaatbare overstromingskans van het beschermde gebied.
- Bij de toetsing is een 'van grof naar fijn' werkwijze denkbaar, met:
 - meest grof: vakken (dwarsdoorsneden) met een evident verwaarloosbare faalkans:
 - kwalitatief: beoordelen op basis van bewezen sterkte in combinatie met monitoring van aantastingen. Deze methode is kansrijk voor met name vakken met een lage norm onder een permanente hydraulische belasting, zoals boezem- en kanaalkaden.
 - kwantitatief: per vak een hypothetische doorsnede construeren waarin alle ongunstige eigenschappen samen komen. Hierbij *wordt dan feitelijk verondersteld dat elke doorsnede zo slecht is als een hypothetisch 'worst case' profiel.*

- meest fijn:
 - een gedetailleerde vakindeling per verandering van elk relevant kenmerk van de doorsnede van de kering, en per vak een doorsnede doorrekenen (*we rekenen dan zo scherp/nauwkeurig als maar kan*).
- Gebruik van eerdere toetsresultaten is goed mogelijk, zeker binnen bovengenoemde ‘grof’ aanpak;
- Indien op basis van bestaande toetsresultaten een ordening in de sterkere en zwakkere profielen wordt aangebracht, dan blijkt vanzelf of het doorrekenen van aanvullende profielen nog een effect heeft op de resulterende overstromingskans van een gebied. Met zo’n ordening, waarbij ge start wordt vanaf de verondersteld zwakste doorsneden, kan de grootte van de inspanning voor een beoordeling aanzienlijk worden beperkt.
- Bij het bepalen van de kans op de overstroming van een gebied wordt bij voorkeur, aanvullend op de kans op het optreden van een initieel faalmechanisme, ook de kans op de benodigde vervolgp-processen tot de uiteindelijke overstroming beschouwd, inclusief de tijdsduur daarvan. De bepaling van de kans op vervolgp-processen en de tijdsduur is niet voor alle faalmechanismen goed mogelijk.

Overwegingen:

- Binnen zowel de overstromings- als overschrijdingskansbenadering zijn een probabilistische (faalkansen berekenen) en een semi-probabilistische (faalkansen schatten of als voldoende klein beoordelen met benaderingsmethoden) werkwijze mogelijk. Kanttekening daarbij is dat de vereiste betrouwbaarheid niet goed kan worden bepaald door de globaal bepaalde ‘factor 5’⁹ voor de overgang van overschrijdingskans naar een overstromingskans. Dit komt door de onduidelijkheid over de omgang met lengte-effecten en de precieze definitie van overbelasting, en het feit dat de ‘factor 5’ niet altijd expliciet is gebruikt bij de afleiding van toetsregels.
- Een dijk kan op meerdere locaties en door meerdere oorzaken doorbreken. Zodoende moeten de afzonderlijke kansen op een doorbraak voor alle doorsneden en voor alle oorzaken binnen een traject worden gecombineerd. Hiervoor bestaan 2 ‘routes’:
 - a. het combineren van faalkansen per doorsnede per faalmechanisme tot de overstromingskans van een gebied;
 - b. het ontleden van een genormeerde overstromingskans van een gebied in faalkansen voor doorsneden (per faalmechanisme en belastingsituatie);
 De eerste variant is minder conservatief en heeft de voorkeur
- De combinatie tot een integrale overstromingskans is op verschillende manieren te doen, van grof (en eenvoudig) tot precies (en geavanceerd). Vaak zal een eenvoudige werkwijze voldoen.
- Een geavanceerde toetsmethode is niet bezwaarlijk, mits deze zo veel mogelijk alleen hoeft te worden toegepast voor complexe / belangrijke situaties. Voor eenvoudige situaties (lage norm, overgedimensioneerde kering, etc.) die evident niet significant bijdragen aan de overstromingskans dient een eenvoudige methode te kunnen worden toegepast.

⁹ factor 5: bij de faalkansbegroting van een boezemkade is als uitgangspunt gehanteerd dat de kans op falen een factor 5 kleiner moet zijn dan de kans op overschrijding van het maatgevend boezempeil.

3.3 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN TOETSMETHODIEK

Conclusie:

- toepassing van de werkwijze en instrumenten uit de overstromingskansbenadering voor de primaire keringen leidt voor de beoordeling van regionale keringen niet tot een eenduidig en reproduceerbaar resultaat. Voor een onomstreden implementatie van deze aanpassingen is dat wel belangrijk. Bovendien zijn hoge berekende overstromingskansen denkbaar. Juist omdat regionale keringen frequent of zelfs permanent worden belast zullen hoge berekende overstromingskansen de geloofwaardigheid van de methode aantasten.

Aanbevelingen:

1. baseer een toetsmethode op het combineren van faalkansen (eigenlijk faalkansbijdragen) per doorsnede per faalmechanisme tot de overstromingskans van een gebied¹⁰;
2. voor het bepalen van faalkansen dienen verschillende werkwijzen mogelijk te zijn, variërend van volledig probabilistische (faalkansen berekenen) of semi-probabilistische (faalkansen schatten met benaderingsmethoden) tot het op basis van 'veilige afmetingen' als voldoende klein beoordelen (geen significante bijdrage aan de overstromingskans) van de faalkans;
3. daarbij dient rekening te kunnen worden gehouden de bewezen sterkte / beheerervaring;
4. hergebruik van eerdere toetsresultaten dient mogelijk te zijn.

Ad.1. zo'n werkwijze is minder conservatief dan een werkwijze waarbij op basis van een faalkansbegroting eisen worden gesteld aan de faalkans per doorsnede

Ad.2 daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan een fasering waarin eerst eenvoudig voor ogenschijnlijk evident robuuste vakken (bestaande toetsresultaten) aan de hand van een conservatief bepaalde vereiste semi-probabilistische veiligheidsfactor de veiligheid wordt beoordeeld, en vervolgens in een tweede fase de toetsing worden vervolgd voor alleen de vakken die geen verwaarloosbare bijdrage aan de overstromingskans geven gedetailleerd (probabilistisch).

Voor een besluit over eventuele aanpassingen van de toetsmethodiek is een nadere uitwerking van resterende kennisvragen nodig, gericht op het verkrijgen van een betrouwbaar, reproduceerbaar en uitlegbaar beeld van de veiligheid, zonder bovenmatige inspanning. Pas na uitwerking van deze kennisvragen kunnen verbeteringen van de toetsmethodiek worden gespecificeerd en tot al dan niet (of hoe) aanpassen worden besloten.

¹⁰ Let op: deze aanbeveling is alleen uitvoerbaar als voor alle faalkansbijdragen geldt dat deze nul/verwaarloosbaar zijn of kwantificeerbaar, dit vergt nog aandacht.

4

AANDACHTSPUNTEN EN AANBEVELINGEN

VERVOLGONDERZOEK

Algemeen

Toetsen versus ontwerpen

Bij een beoordeling van de veiligheid op basis van een overstromingskans is het falen uit oogpunt van een (initieel) mechanisme acceptabel, zo lang deze niet leidt tot een overstroming. Bij het ontwerpen van een versterking is zo'n aanpak niet verstandig, zeker niet als voor toetsing en ontwerp dezelfde overstromingskansnorm en (grotendeels) dezelfde uitgangspunten worden gehanteerd. Frequent optredende vervormingen van taluds of regelmatige beschadiging van bekledingen zonder dijkdoorbraak tot gevolg zijn uit oogpunt van beheerskosten of LCC – analyses onwenselijk. Bij het ontwerpen zullen zodoende afwijkende (strengere) eisen gelden, waardoor een groter verschil tussen toetsen en ontwerpen ontstaat dan nu het geval is.

Toetsen aan een overstromingskans

Calamiteiten

De berekende overstromingskans van een gebied is niet gelijk aan de kans dat een gebied zal overstromen gegeven een specifieke belastingsituatie. Bij toepassing van een overstromingskans-benadering is voor een goed beeld van de actuele veiligheid inzicht in de zgn. conditionele faalkans van de afzonderlijke dijkvakken nuttig. Een conditionele faalkans is de kans op falen gegeven een specifieke belasting. Inzicht in de conditionele faalkans via zgn. fragility curves vergt een aanvullende bewerking van de uitgevoerde veiligheidsanalyses, en mogelijk ook het uitvoeren van aanvullende berekeningen hiervoor (soort gevoeligheidsanalyse).¹¹

Minimale eisen aan de sterkte (conditionele faalkansen)

Bij het doorrekenen van belastingcombinaties, in zowel de overschrijdingskans- als overstromingskansbenadering, is het van belang om rekening te houden met de afhankelijkheden tussen extreme belastingen. Als verschillende soorten belastingen, bijv. een zware verkeersbelasting of een aardbeving tijdens hoogwater, onafhankelijk zijn en van korte duur, dan is de kans zeer klein dat ze *gelijktijdig* zeer hoog zijn. Indien voor een specifieke belastingsituatie de standzekerheid van de kering gewenst is, dient aanvullend een specifieke eis (in termen van een conditionele kans) te worden gespecificeerd en daaraan te worden beoordeeld.

Faaldefinities

De huidige toets- en ontwerpregels beschouwen alleen het optreden van een enkel mechanisme en niet het bezwijken van de dijk. Hoe om te gaan met de stappen tussen overbelasting (initiatie) en overstroming is nog een belangrijke onderzoeksvraag. Daarbij speelt o.a. de benodigde tijdsduur tot falen een rol. Complex daarbij is dat per initieel mechanisme soms

¹¹ Binnen de overschrijdingskansbenadering wordt vaak één enkele berekening gemaakt (voor één veilige schematisering bij de maatgevende waterstand en voorkomende overige belastingen). Bovenstaand genoemd inzicht zou ook binnen de overschrijdingskansbenadering aanvullende werkzaamheden vergen.

andere (combinaties van) belastingen de maatgevende situatie vormen. Dit laatste aspect geldt bij boezem- en kanaalkaden aanzienlijk minder dan bij de keringen langs regionale rivieren.

Hergebruik eerdere toetsresultaten

Gestreefd moet worden naar het mogelijke hergebruik van eerdere toetsresultaten. Dit kan direct gebeuren voor het eenvoudig schatten van de faalkans dan wel indirect voor het filteren van vakken met een evident voldoende veilig profiel (= verwaarloosbare faalkans) of het selecteren van de vakken met een hoge faalkans en het bepalen van de werkvolgorde).

BIJLAGEN



Veiligheidsbenadering regionale keringen

Voorbeelduitwerking
overstromingskansbenadering

Opdrachtgever



STOWA



Veiligheidsbenadering regionale keringen



Voorbeelduitwerking
overstromingskansbenadering
Eindrapportage

Auteur(s)

Jochem Caspers
Guy Dupuits

PR4503.20
maart 2024

Samenvatting

In deze rapportage is een voorbeelduitwerking gegeven van een overstromingskansbenadering voor een regionale kering. Voor de voorbeelduitwerking is gebruik gemaakt van de casus 'Boezemkade – landelijk gebied', in het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Dit betreft een van de eerdere pilots van de verkenning naar verbeteringen van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen. Centraal staat de werkwijze om te komen tot een overstromingskans voor een polder. De voornaamste doelen van de voorbeelduitwerking zijn (1) illustreren hoe op pragmatische wijze een plausibele overstromingskans voor een polder (beschermd door regionale keringen) kan worden bepaald, en welke inspanning hiermee gemoeid is en (2) beschouwen hoe de resultaten van een beoordeling op basis van een overstromingskansbenadering zich verhouden tot de huidige overschrijdingskansbenadering.

Voor de kadering van het pilotgebied is in 2014 (en 2022) een hoogtetoets en in 2016 (en 2022) een stabiliteitstoets uitgevoerd. De resultaten van deze toetsingen zijn gehanteerd om een filtering toe te passen. Door het toepassen van deze filtering zijn er enkel 16 probabilistische sommen gemaakt om de overstromingskans van het gebied te benaderen. Alle overige locaties zijn als evident veilig beschouwd.

In de uitwerking voor hoogte is niet gerekend met een vast kritiek overslagdebiet. In plaats daarvan is voor een range aan overslagdebieten met PROMOTOR de (jaarlijkse) overschrijdingskans bepaald. Indien door PROMOTOR onrealistisch hoge overschrijdingskansen (eens per 10 jaar) worden berekend bij lage overslagdebieten (tot en met 5 l/s/m) kan op basis van de kennis van de beheerder de kansverdeling van het kritiek overslagdebiet worden aangepast. Zo kan ervoor worden gezorgd dat de overschrijdingskansen passen bij de kennis en ervaring van de beheerder.

De berekeningen voor binnenwaartse stabiliteit zijn gemaakt aan de hand van 3D-fragility curves¹. Verondersteld is dat de freatische lijn (door buitenwaterstand of neerslag) en de verkeerslast de twee drijvende belastingen zijn voor instabiliteit. Voor in totaal negen combinaties van freatische lijn en verkeerslast zijn de conditionele kansen op afschuivingen bepaald. Indien hoge conditionele kansen op afschuivingen resulteren zijn er door middel van een faalpad de kansen op vervolprocessen afgeleid. Er vindt immers na een initiële afschuiving nog niet altijd direct een overstroming plaats.

Voor het faalmechanisme piping zijn conditioneel op de waterstand kansen op de deelmechanismen heave, uplift en terugschrijdende erosie bepaald. Dit resulteert in (2D) fragility curves. Indien bij lage waterstanden (tot eens per 10 jaar) onrealistisch hoge kansen op piping resulteren kan op basis van de kennis van de beheerder de intredeweerstand worden aangepast. Zo wordt gezorgd dat de resultaten passen bij de kennis en ervaring van de beheerder.

Met de gehanteerde werkwijze in deze voorbeelduitwerking voor de drie faalmechanismen is het nog steeds mogelijk om berekeningen met andere uitgangspunten op te stellen. Zo kan gerekend worden met een vast kritiek overslagdebiet in PROMOTOR. Ook kan de binnenwaartse stabiliteit voor een enkele belastingcombinatie (van freatische lijn en verkeerslast) worden uitgerekend, en kan voor één belastingcombinatie meerdere ondergrondscenario's worden toegepast. Ook de kans op piping kan stationair (voor één waterstand) worden uitgerekend, en kan voor deze stationaire

¹ Een 3D-fragility curve geeft de conditionele faalkans gegeven een combinatie van twee variabele belastingen.

berekening meerdere ondergrondscenario's worden gehanteerd. Deze methodes leiden ook tot een faalkans van de getoetste doorsnede.

Door het toepassen van de rekentechnieken uit deze voorbeelduitwerking zijn er plausible faalkansen afgeleid voor de 16 locaties van de kadering. Deze faalkansen zijn per doorsnede benaderd en vertaald naar een totale overstromingskans voor de polder. Voor hoogte is er een hoge mate van correlatie tussen doorsneden in vergelijking tot geotechnische mechanismen. Daarom is de doorsnedekans gelijk genomen aan de vakkans voor hoogte. Bij macro-instabiliteit binnenwaarts en piping wordt de faalkans van een vak groter (met toenemende lengte) dan de faalkans van de doorsnede. Tot slot zijn de faalkansen van faalmechanismen afhankelijk en gecombineerd tot een trajectkans van 1/160-1/265 per jaar. Daarbij is aangenomen dat de faalmechanismen onafhankelijk zijn.

Om een indruk te geven van de relatie tussen overstromings- en overschrijdingskans, is in deze voorbeelduitwerking de resulterende overstromingskans vergeleken met het IPO-klasse III overschrijdingskansniveau van de kadering. De regionale waterkering heeft een veiligheidsnorm van 1/100 per jaar (overschrijdingskans). De berekende faalkans van de kadering ligt tussen de 1/160-1/265 per jaar en is getalsmatig kleiner dan de overschrijdingskansnorm. Dit is plausibel aangezien de kritische dijkvakken in de kadering tussen 2018 en 2020 zijn versterkt. Bij dit resultaat dient te worden vermeld dat of een directe, getalsmatige vergelijking van overstromingskansen met IPO-normen toepasbaar is, een openstaande vraag is.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	2
1.3	Leeswijzer	2
2	Methode	3
3	Casus	6
3.1	Ontstaansgeschiedenis	7
3.2	Beschikbare gegevens	7
4	Toepassing	13
4.1	Resultaten Hoogte	13
4.2	Resultaten Stabiliteit	18
4.3	Resultaten Piping	24
4.4	Beschouwing resultaten faalmechanismen	28
5	Conclusies	31
5.1	Doelstelling 1: overstromingskansbenadering	31
5.2	Doelstelling 2: overstromings- versus overschrijdingskans	35
6	Discussie	37
7	Referenties	38
	Bijlagen	39
A	Hoogte	41
B	Stabiliteit	57
C	Piping	75

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Nederlandse waterkeringen, zowel primair als regionaal, worden getoetst en ontworpen volgens een vastgestelde veiligheidsbenadering. Voor de primaire keringen is de veiligheidsbenadering recent (2017) aangepast, waarbij is overgestapt van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering. Momenteel wordt verkend of de veiligheidsbenadering van regionale keringen kan worden verbeterd.

Een regionale kering is een niet-primaire waterkering die is aangewezen op basis van een provinciale verordening en waarvoor een veiligheidsnorm is vastgesteld (IPO-normering). Hieronder vallen zowel 'natte' keringen, bijvoorbeeld langs boezemwateren, als 'droge' keringen, langs regionale rivieren. De huidige veiligheidsbenadering voor regionale keringen is een overbelastingbenadering, waarbij wordt gekeken naar de vraag of de kering een waterstand met een bepaalde overschrijdingskans veilig kan keren. Toetsing en ontwerp worden uitgevoerd met deterministische en semi-probabilistische rekenregels.

In het kader van de verkenning naar verbeteringen van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen zijn in opdracht van STOWA vier pilots uitgevoerd, waarin voor een pilotgebied verschillende onderwerpen/onderzoeksvragen zijn uitgewerkt. Centraal hierin stonden een viertal verbeteringen van de vigerende veiligheidsbenadering. De opgedane inzichten in deze pilots dienen de toekomstige besluitvorming over de verbetering van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen. Hieronder zijn de vier pilots opgesomd, die elk zijn uitgevoerd door een marktpartij in combinatie met een waterschap:

- Pilot Regionale rivier – landelijk gebied (Sweco en Waterschap Hunze en Aa's)
- Pilot Regionale rivier – stedelijk gebied (IV-Infra/Tauw en Waterschap Aa en Maas)
- Pilot Boezemkade – landelijk gebied (Witteveen+Bos en Wetterskip Fryslân)
- Pilot Boezemkade – stedelijk gebied (HKV en Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard)

Deze rapportage beschrijft een voorbeelduitwerking van een overstromingskansbenadering voor regionale keringen waarbij gebruik is gemaakt van de in de pilots opgedane leerervaringen. Centraal staat de werkwijze om te komen tot een overstromingskans voor een polder. De rapportage vormt een onderdeel van een aantal rapporten die in het kader van deze verkenning zijn uitgebracht. Zie Tabel 1-1.

Tabel 1-1: Rapportages verkenning veiligheidsbenadering

Titel	Auteur
Veiligheidsbenadering regionale keringen: Boezemkade – stedelijk gebied	M. van Montfoort (HKV)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: Regionale rivier – landelijk gebied	M. Kampen en M. Stam (Sweco)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: Regionale rivier – stedelijk gebied	M. Monden & D. Wubben (Iv-Infra) B. Bouman & N. van Dijk (TAUW)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: Boezemkade – landelijk gebied	G.P van Rinsum (WiBo)

Integrale conclusies pilots	M. van Montfoort (HKV)
Bouwstenenrapport	M. van Montfoort (HKV)
Consequentie analyse	E. van der Heijden (STOWA)
Samenvatting bevindingen verbetering veiligheidsbenadering	
Voorbeelduitwerking overstromingskansbenadering	J. Caspers (HKV)

1.2 Doel

De voornaamste doelen van de voorbeelduitwerking zijn:

1. Illustreren hoe op pragmatische wijze een plausibele overstromingskans voor een polder (beschermd door regionale keringen) kan worden bepaald, en welke inspanning hiermee gemoeid is;
2. Beschouwen hoe de resultaten van een beoordeling op basis van een overstromingskansbenadering zich verhouden tot de huidige overschrijdingskansbenadering.

Waarbij doelstelling (1) is onderverdeeld in de volgende onderdelen:

- a. Illustreren hoe berekeningen uit eerdere toetsingen (conform de huidige overschrijdingskansbenadering) kunnen worden hergebruikt in de overstromingskansbenadering.
- b. Het bepalen van een plausibele faalkans op doorsnedeniveau per faalmechanisme (voor hoogte, binnenwaartse stabiliteit en piping). Hier wordt geïllustreerd hoe rekenen met een overstromingskansbenadering en bijbehorende rekentechnieken kan leiden tot een reële(re) faalkans op doorsnedeniveau;
- c. Het vertalen van de faalkansen per doorsnede per faalmechanisme naar een totale overstromingskans voor de polder (assemblage), rekening houdend met onderlinge correlaties en lengte-effect met een pragmatische, doch realistische werkwijze;

Voor de voorbeelduitwerking is gebruik gemaakt van de casus 'Boezemkade – landelijk gebied', in het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Dit betreft een van de eerder genoemde pilots. Om de voorbeelduitwerking zowel volledig als werkbaar te houden, is een fictieve aangepaste vorm van de kadering gebruikt. Ten behoeve van doelstelling (1) is de overstromingskans van de door kadering beschermde polder bepaald, waarna deze is vergeleken met resultaten conform de huidige overschrijdingskansbenadering (doelstelling 2).

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 is de methode beschreven in beide doelstellingen uit te werken met een voorbeeld (of casus) welke in Hoofdstuk 3 is beschreven. In Hoofdstuk 4 is de overstromingskans van het beschermde gebied uitgewerkt voor drie faalmechanismen. In Hoofdstuk 5 zijn de conclusies gegeven voor beide doelstellingen en tot slot is in Hoofdstuk 6 een discussie opgenomen aan de hand van deze voorbeelduitwerking.

2 Methode

Een overstromingskans kan op verschillende manieren worden bepaald. De systematiek van het WBI en het BOI voor de Nederlandse primaire keringen is daarvan een voorbeeld, net zoals de systematiek uit eerdere studies zoals Picaso en VNK2. Ook in het buitenland worden er verschillende methodes gebruikt. Zo wordt in de VS bij de veiligheidsbeoordeling van dijken en dammen gewerkt met relatief grove prioriteringsmethoden en gedetailleerde risicoanalyses met Expert Opinion Elicitation voor de bepaling van overstromingskansen.

In deze studie wordt geïllustreerd hoe op pragmatische wijze een plausibele overstromingskans voor een polder (beschermd door regionale keringen) kan worden bepaald, en welke inspanning hiermee gemoeid is. Er is geen nadere analyse gedaan naar de implementatie (on)mogelijkheden voor meerdere beheerdersgebieden. De aanpak is toegesneden op regionale keringen en dus niet identiek aan de aanpak uit WBI en BOI voor de primaire keringen, al zijn er op onderdelen gelijkenissen. Daartoe is in dit hoofdstuk een werkwijze uitgewerkt die is toegepast op de casus 'Boezemkade – landelijk gebied'. Deze casus wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 3. De werkwijze is generiek en kan worden toegepast op regionale keringen. De volgende stappen zijn te onderscheiden;

1. Identificatie van potentieel risicovolle strekkingen (hierna: 'maatgevende strekkingen'), op basis van eerdere toetsresultaten en/of het oordeel van de beheerder. Dit zijn strekkingen waarvan de verdenking bestaat dat ze per faalmechanisme (in deze casus; hoogte, macro-instabiliteit binnenwaarts en piping) een wezenlijke bijdrage hebben aan de totale trajectkans. Een nadere analyse is op deze locaties gewenst.
 - De maatgevende strekkingen kunnen verschillende liggingen hebben voor elk relevant faalmechanisme. Wanneer een versterkte strekking nog aan het ontwerpprofiel voldoet wordt de faalkansbijdrage aan de trajectkans verwaarloosbaar geacht. Dit houdt verband met het feit dat er in de praktijk robuust wordt ontworpen en er veelal sprake is van enige overdimensionering vanwege o.a. ruimtelijke inpassing en uitvoering.
2. Voor de maatgevende strekkingen zijn de locatie(s) doorgerekend waarvan verwacht wordt dat die de grootste faalkans hebben in de strekking.
 - Om tot plausibele faalkansen te komen worden probabilistische berekeningen gemaakt met modellen die de voornaamste stappen in het faalproces beschrijven. Op basis van de uitkomst kan een beheerdersoordeel of een aanscherping door middel van een nadere uitwerking van het faalpad worden toegepast. De ervaringen vanuit het beheer verdienen hierin een belangrijke plaats. Resultaten moeten verklaarbaar zijn en zijn te verenigen met de ervaring. Dit kan betekenen dat verfijning nodig is door bijvoorbeeld rekening te houden met overleefde waterstanden, wat op uiteenlopende manieren kan worden gedaan (van grof tot fijn).
3. Combineren van de faalkansen van doorsnedes naar vakken per faalmechanisme (vergelijkbaar met assemblage in het BOI).
 - Om tot een vakkans te komen dient zowel de variatie van faalkansen in het vak bekend te zijn als de ruimtelijke afhankelijkheid. Voor hoogte is de variatie in faalkansen in een vak vaak gering omdat de strekking vaak uniform belast wordt en de hoogte van de kering weinig varieert. Ook is de ruimtelijke afhankelijkheid groot (klein lengte-effect) omdat de hydraulische belasting voor dit mechanisme een dominante onzekerheid is en die is ruimtelijk sterk gecorreleerd. Voor geotechnische mechanismen is die variatie groter door

variaties in de ondergrond. Ook is het lengte-effect (toenemende faalkans met toenemende lengte) voor geotechnische faalmechanismen groter dan voor het faalmechanisme hoogte omdat de onzekerheid over de sterkte-eigenschappen van de grond voor de geotechnische mechanismen relatief belangrijk zijn, en deze over korte afstanden kunnen fluctueren.

Door de één na maatgevende locatie door te rekenen kan de vakkans worden aangescherpt. Ook kunnen delen van de strekking waarvan op voorhand duidelijk is dat ze niet wezenlijk bijdragen aan de faalkans worden genegeerd in de bepaling van de vakkans.

4. Combineren van de faalkansen van vakken naar traject per faalmechanisme.
 - Voor hoogte is er een hoge mate van correlatie tussen vakken in vergelijking tot geotechnische mechanismen. Dit komt doordat het falen op hoogte door de belasting (storm) wordt gedomineerd en het falen op geotechniek ook door de (heterogene) ondergrond wordt beïnvloed. Bij het combineren van de faalkansen voor hoogte wordt daarom gekeken naar verschillende belastingsituaties die langs de kering een rol spelen. Bij het combineren van de faalkansen voor geotechnische mechanismen wordt aangenomen dat de vakken onafhankelijk zijn. Dit betekent dat de faalkansen per vak grofweg kunnen worden gesommeerd. De ervaring uit bijvoorbeeld VNK2 leert dat deze benaderingen voor hoogte en geotechnisch falen vrij nauwkeurig zijn.
5. Combineren van de faalkansen van faalmechanismen naar traject.
 - De verschillende faalmechanismen kunnen los van elkaar optreden. Echter, er bestaat wel degelijk enige afhankelijkheid tussen de verschillende faalmechanismen omdat in veel situaties er een verhoogde waterstand (of waterdruk/-spanning) benodigd is voor het falen van de kering. Vanuit de theorie volgt dat de correlatie tussen mechanismen zeer groot moet zijn voordat er een wezenlijk effect op de gecombineerde faalkans is te verwachten (zie ook de vele praktijkvoorbeelden uit VNK2). Er is daarom aangenomen dat de faalmechanismen onafhankelijk zijn. Dit betekent dat de faalkansen per faalmechanisme grofweg kunnen worden gesommeerd.

In deze methode volstaat een beperkt aantal probabilistische analyses. De filosofie is om de potentieel risicovolle locaties voor de voornaamste faalmechanismen te analyseren op een hoog detailniveau in plaats van het (geautomatiseerd) doorrekenen van veel locaties op een beperkt detailniveau. Door bijvoorbeeld gebruik te maken van lokale data (lokaal te schematiseren) en geen gebruik te maken van meerdere ondergrondscenario's wordt de trajectkans (per faalmechanisme) nauwkeuriger afgeleid.

In de volgende paragrafen worden de methoden voor de verschillende faalmechanismen toegelicht.

Hoogte

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme hoogte (GEKB) is berekend, gebruik makend van de software PROMOTOR (Probabilistisch Model Toetspeilen Regionale waterkeringen). Dit is nader beschouwd en uitgewerkt in paragraaf 4.1. Ter bepaling van de overstromingskans voor hoogte is de volgende werkwijze gehanteerd:

- Inventarisatie van de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans. Dit is geïnventariseerd op basis van de toetsresultaten uit 2015 en 2022;
- In plaats van een deterministisch kritiek overslagdebiet is een kansverdeling opgesteld voor het kritieke overslagdebiet. Daarnaast zijn de geschematiseerde profielen uit de toetsingen gecontroleerd of deze nog overeenkomen met de actuele werkelijkheid;
- Voor een reeks aan kritische overslagdebieten zijn faalkansberekeningen gemaakt met PROMOTOR. Deze berekeningsresultaten zijn gecontroleerd aan de hand van de beheerderservaring. *Ter illustratie: als de kans op tenminste 10 l/s/m bij een dijk uit de casus 1/5 per jaar is, en de beheerder niet bekend is met overslaand water op deze locatie, dan is dit*

niet reëel. Dit is dan een reden om kritisch te kijken naar de belastingstatistiek en/of schematisering van het bijbehorende dijkprofiel.

- De resultaten zijn gecombineerd tot faalkansen voor de maatgevende doorsnede(n) in de strekkingen;
- De relatie tussen strekkingen is bepaald aan de hand van het type watersysteem en het type maatgevende belasting (volgend uit de PROMOTOR berekeningen).

Stabiliteit

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme stabiliteit binnenwaarts (STBI) is berekend met gebruik van de software D-Stability. Dit is nader beschouwd en uitgewerkt in paragraaf 0. Ter bepaling van de faalkans voor stabiliteit binnenwaarts is de volgende werkwijze gehanteerd:

- Inventarisatie van de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans. Dit is geïnventariseerd op basis van de toetsresultaten uit 2014.
- Probabilistische analyses voor de maatgevende doorsnede in de strekking. De probabilistische berekeningen zijn gemaakt aan de hand van 3D-fragility curves². Ervaring leert dat de freatische lijn (door buitenwaterstand of neerslag) en de verkeerslast de drijvende belastingen zijn voor binnenwaartse stabiliteit. Voor regionale keringen speelt neerslag overigens een grotere rol dan bij primaire keringen omdat de buitenwaterstand minder fluctueert bij boezems en meren dan op de grote rivieren.
- Aanscherping (indien mogelijk) van de probabilistische analyses door het kwantificeren van vervolgmecanismen, zoals kruinverlaging na afschuiving, in het faalpad.

Piping

Er is in de onderzochte casus slechts een beperkt verschil tussen dagelijkse waterstanden en toetspeil. Hoogwaters zijn van relatief korte duur. Ook is er geen sprake van een sterke stroming (meer) zodat het aannemelijk is dat er sprake is van aanzienlijke intredeweerstand door neergeslagen slib. Dit betekent dat de kans op falen door piping zeer klein zal zijn. Ook de beheerderservaring geeft geen aanleiding tot zorgen over piping (bijv. geen waarnemingen van zandmeevoerende wellen). Om hier enig getalsmatig gevoel bij te geven, zijn -zeer conservatief- berekeningen uitgevoerd met de rekenregel van Sellmeijer. Dit is nader beschouwd en uitgewerkt in paragraaf 4.3.

- De faalkans als gevolg van het faalmechanisme piping (STPH) is berekend gebruik makend van een probabilistische piping tool in Python. In deze tool is de regel van Sellmeijer toegepast. Er wordt uitgegaan van een stationaire belastingsituatie en zonder rekening te houden met bewezen sterkte, maar wel met intredeweerstand op de bodem van het buitenwater.

² Een 3D-fragility curve geeft de conditionele faalkans gegeven een combinatie van twee variabele belastingen.

3 Casus

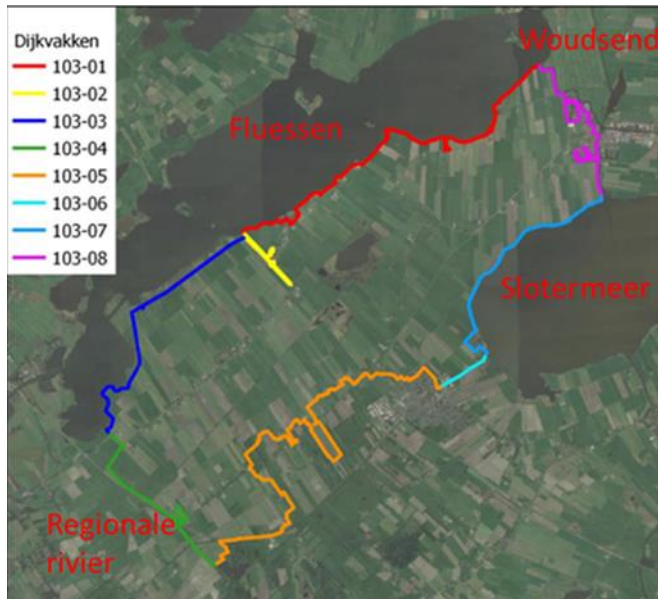
In voorliggende voorbeelduitwerking wordt de overstromingskans bepaald voor een landelijk gebied beschermd door een boezemkade in het beheer van Wetterskip Fryslân. Het betreft een regionale dijkkring met een lengte van 48,3 km, in het zuidwesten van de provincie Friesland. Het pilotgebied ligt tussen het Fluessen meer en het Slotermeer. De waterkering heeft IPO-klasse III (veiligheidsnorm 1/100).

Onderstaande afbeelding toont een bovenaanzicht van de regionale kering. Hier zijn verschillende dijkvakken benoemd. Ten behoeve van de voorbeelduitwerking is de casus wat versimpeld en aangepast. De dijkvakken 103-05 en 103-06 zijn niet beschouwd in de analyse. Voor deze dijkvakken is aangenomen dat deze niet bijdragen aan de totale faalkans van de polder omdat deze dijkvakken aan de hoge gronden grenzen. De beschouwde delen van de casus zijn:

- Een deel langs het Fluessen meer (en Heegermeer) in het noorden (103-01 t/m 103-03);
- Een deel langs een regionale rivier in het zuidwesten (103-04);
- Een deel langs het Slotermeer in het zuidoosten (103-07);
- Een deel langs een boezem bij Woudsend in het oosten (103-08).

De beschouwde dijkvakken die in de figuur zijn getoond, met een lengte van 26 km, zijn in deze pilot beschouwd als één dijktraject. De waterkering omsluit een polder met landbouwgronden, een aantal dorpjes en het natuurgebied It Swin. De kadering omringt de volgende polders: Groot Noordwolderpolder, Venenpolder, Spookhoekstervaart, Harich-Elahuizen en Yndyk. In het beschermde gebied bevinden zich nog een aantal kleinere dorpjes. Er zijn verschillende belastingsscenario's denkbaar die tot een overstroming kunnen leiden; hevige neerslag, stormen vanuit het noordwesten en vanuit het zuidoosten, een hoge afvoer in de regionale rivier en lokale incidenten (zoals graverijen, aanvaringen, etc.).

In werkelijkheid is in het zuidwesten géén regionale rivier aanwezig, maar een boezem. Ten behoeve van de voorbeelduitwerking is het theoretische geval beschouwd dat hier een regionale rivier aanwezig is. Zo zijn alle mogelijke watersystemen vertegenwoordigd binnen deze (fictieve) casus.



Figuur 3-1 Overzicht casusgebied kadering KR103.

3.1 Ontstaansgeschiedenis

De contouren van Zuidwest Friesland zijn in de voorlaatste ijstijd (circa 800 v. Chr.) gevormd. Door de beweging van een ijskap vanuit Scandinavië over Noord- en Midden Nederland ontstaat het Gaasterlandse stuwwal-landschap. In de periode na de voorlaatste ijstijd zorgden inbraken vanuit de zee voor de afzetting van klei. Daarbij vormde zich een nieuw kleilandschap met strandwallen en kwelders. Verder landinwaarts ontwikkelde zich gedurende deze periode een grootschalig veenlandschap. Aan het begin van de ijzertijd (circa 700 v. Chr.) werden de kweldergronden steeds meer gebruikt voor veeteelt en akkerbouw. Het kweldergebied slibde steeds verder op en het achterland bleef steeds langer droog liggen tijdens vloed. In deze periode ontstond er permanente bewoning in Zuidwest Friesland op terpen. Vanaf de twaalfde eeuw werden de hoofdstructuren van het landschap definitief. De veenontginningen hadden in deze periode hun grens bereikt en door de dalende bodem werd het steeds moeilijker om de veengebieden te ontwateren. Om toch droge voeten te houden, werd een netwerk van sloten, kanalen en vaarten aangelegd. Ook veel van de Friese meren zijn in deze periode ontstaan (Nationaal Landschap Zuidwest Fryslân, 2021).

De kadering wordt vandaag de dag omsloten door verschillende meren, vaarten en kanalen in Zuidwest Fryslân. De polders die omsloten worden door de kadering bestaan voornamelijk uit veengronden. Richting het zuidelijke deel van de polder verandert de ondergrond langzaam naar zand en de hoge gronden van het Gaasterland. Dit is duidelijk terug te zien in de zandige hoge gronden in het zuiden van de kadering, zie Figuur 3-2 (Rinsum van G.P., 2022).

3.2 Beschikbare gegevens

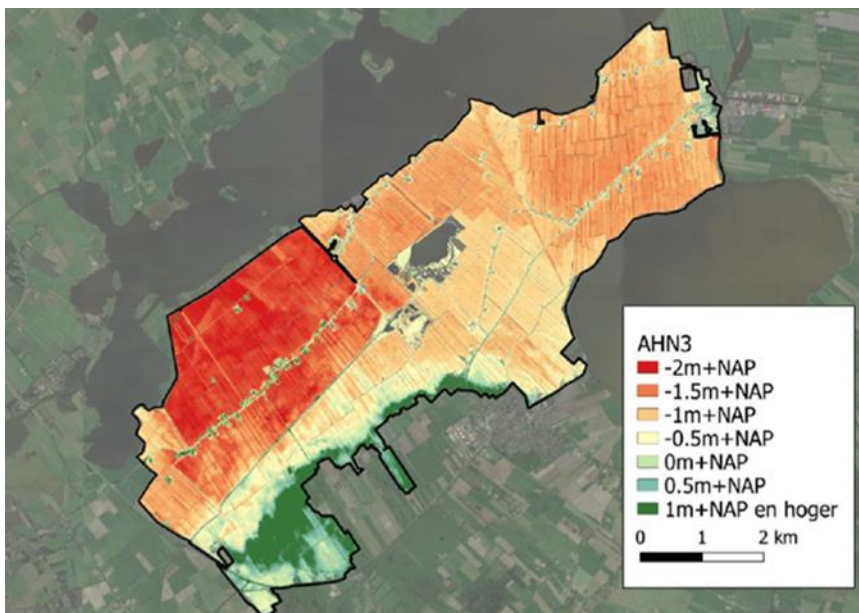
Wetterskip Fryslân (WF) beheert 3.062 km regionale waterkeringen langs de boezem. In het Provinciaal Waterhuishoudingsplan en het Waterbeheerplan van Wetterskip Fryslân is opgenomen dat er elke zes jaar een veiligheidstoetsing van de regionale keringen aan de provinciale norm wordt uitgevoerd. Hierover wordt gerapporteerd aan de provincies Fryslân en Groningen. De veiligheidstoetsing bestaat uit een jaarlijkse en een hoogte- en stabiliteitstoets per toetsperiode. De laatste hoogtetoets dateert uit 2014 en de laatste stabiliteitstoets dateert uit 2016.

Bij de hoogtetoetsing is gebruik gemaakt van het door de STOWA gefaciliteerde programma PROMOTOR, om de benodigde kruinhoogte van de regionale waterkeringen te berekenen. Dit maakte het mogelijk om het proces te automatiseren en nauwkeuriger en efficiënter te toetsen (Bosma, 2014). Promotor is een probabilistisch model om regionale waterkeringen op hoogte te toetsen. Het programma stelt de gebruiker in staat om bij een gegeven overschrijdingsfrequentie (1/100, 1/300 of 1/1000) het bijbehorende hydraulische belastingniveau te berekenen, of andersom, bij een gegeven kruinhoogte de overschrijdingsfrequentie berekenen (Kuijper, 2021).

Bij de beoordeling van de stabiliteit van de regionale waterkeringen in het beheergebied van Wetterskip Fryslân is de systematiek gevolgd conform de LTV 2007 (LTV, 2007) en het Addendum (LTV, 2011) hierop, namelijk een stapsgewijze toetsmethode. Voor de stabiliteitstoets is gebruik gemaakt van de door Deltares, in opdracht van STOWA, ontwikkelde Dijksterkte Analyse Module (DAM). DAM is een platform waarmee voor een groot deel automatisch stabiliteitsberekeningen van grote dijkstrekkingen worden uitgevoerd. Afhankelijk van de toepassing kan dit leiden tot kostenbesparing en herleidbaarheid van de resultaten (Bosma, 2016). Hiervoor is het wel een vereiste dat berekeningen niet 'voor waar' worden aangenomen maar worden benut in een meer omvattend proces van deskundige oordeelsvorming.

Hoogteprofiel

In Figuur 3-2 is een hoogtekaart weergegeven van het gebied op basis van het AHN3. Het westelijk deel van het achterland ligt laag met een maaiveldhoogte rond NAP -2,0 á NAP -1,5 m. Het noordelijke deel van het achterland ligt rond NAP -1,5 á NAP -1,0 m. De rest van het achterland ligt rond NAP -1,0 á NAP +0,5 m, met uitzondering van de hoge gronden in het zuiden. Deze liggen rond NAP +1,0 m en hoger (Rinsum van G.P., 2022).

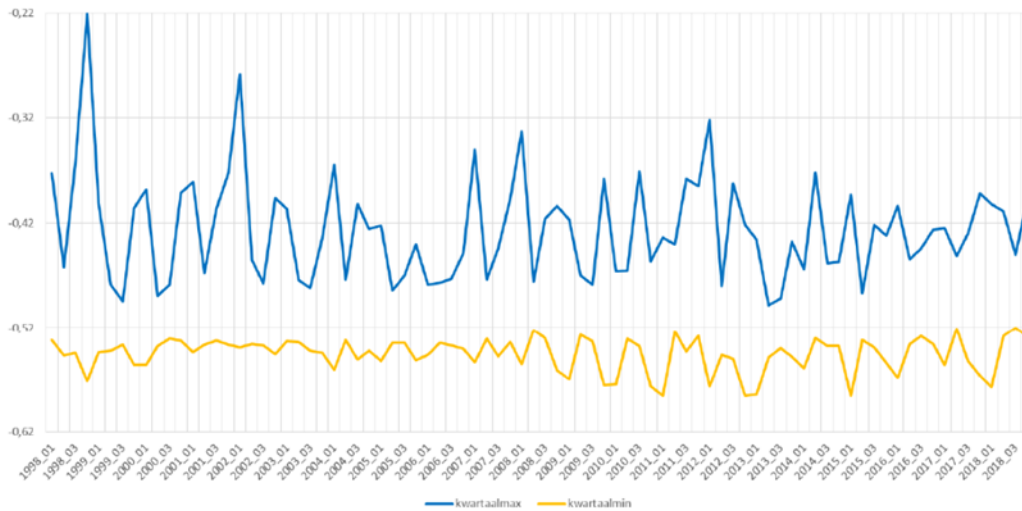


Figuur 3-2 Hoogteprofiel achterland op basis van AHN3 (Rinsum van G.P., 2022).

Hoogwater

Hoogwater op de Friese boezem is het gevolg van een combinatie van regenval en wind. Langdurige regenval zorgt voor een verhoging van het boezempeil. Dit water kan door middel van gemalen en (spui)sluizen afgevoerd worden richting het IJsselmeer of de Waddenzee. Harde wind

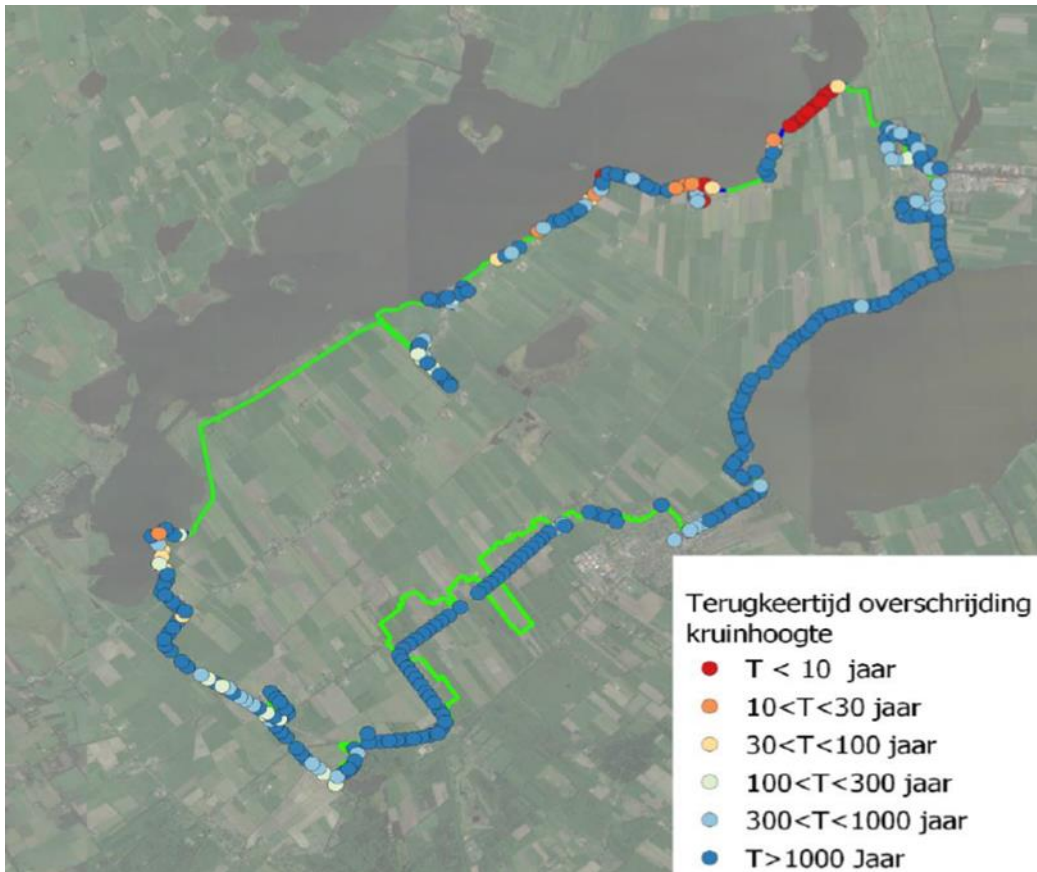
kan zorgen voor verhoogde waterstanden door scheefstand van het peil in de boezem (Rinsum van G.P., 2022). Ter indicatie van de te verwachten waterstanden op de Friese boezem is het verloop van de waterstand op de Friese boezem weergegeven in Figuur 3-3 (Wetterskip Fryslân, 2021).



Figuur 3-3 maxima en minima per kwartaal gedurende de periode 1998 tot 2018 (Rinsum van G.P., 2022).

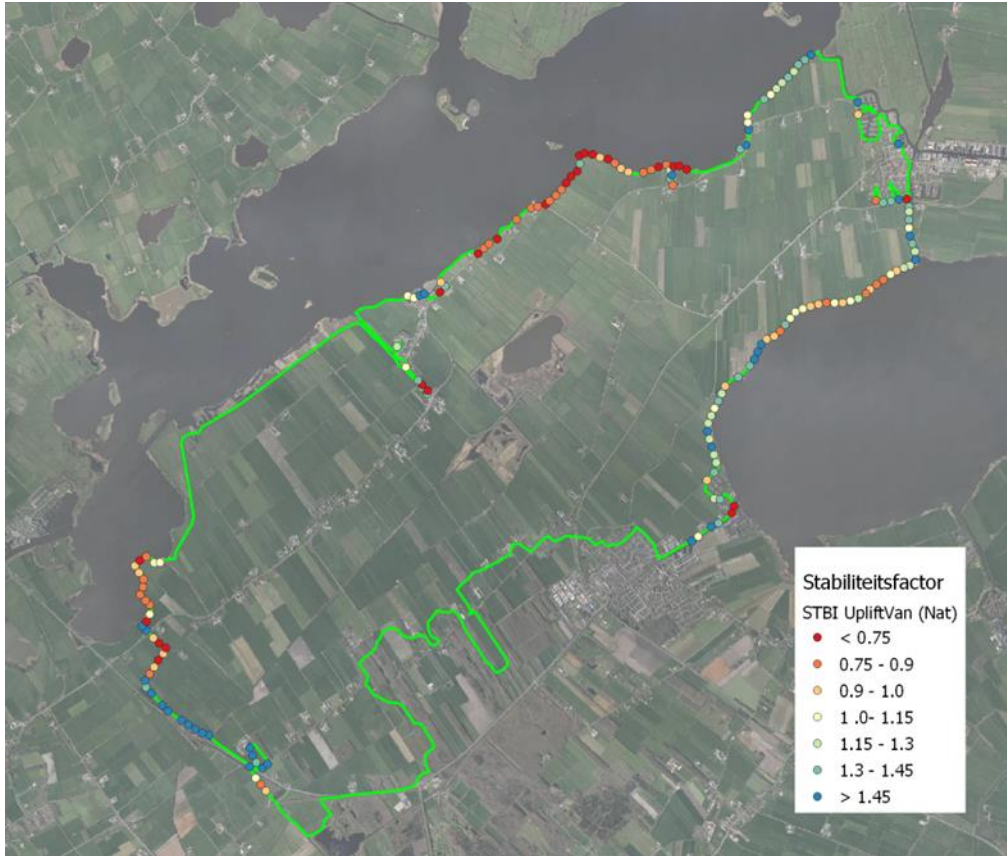
Toetresultaten

In 2014 is door Wetterskip Fryslân een beoordeling op hoogte uitgevoerd met PROMOTOR. De uitgevoerde probabilistische sommen zijn weergegeven in Figuur 3-4. De terugkeertijd van de overschrijding van de kruinhoogte is gegeven met in rood frequente en in blauw niet frequente overschrijding. Tijdens de beoordeling door Wetterskip Fryslân is een kritiek overslagdebiet aangehouden van 1 l/s/m (Bosma, 2014). In Figuur 3-4 is te zien dat de overschrijdingsfrequenties het hoogste zijn (kleinste terugkeertijden) langs de noordzijde langs het Fluessen meer en langs de zuidzijde langs de Rijstervaart. Deze secties zijn dan ook tussen 2018 en 2020 versterkt.

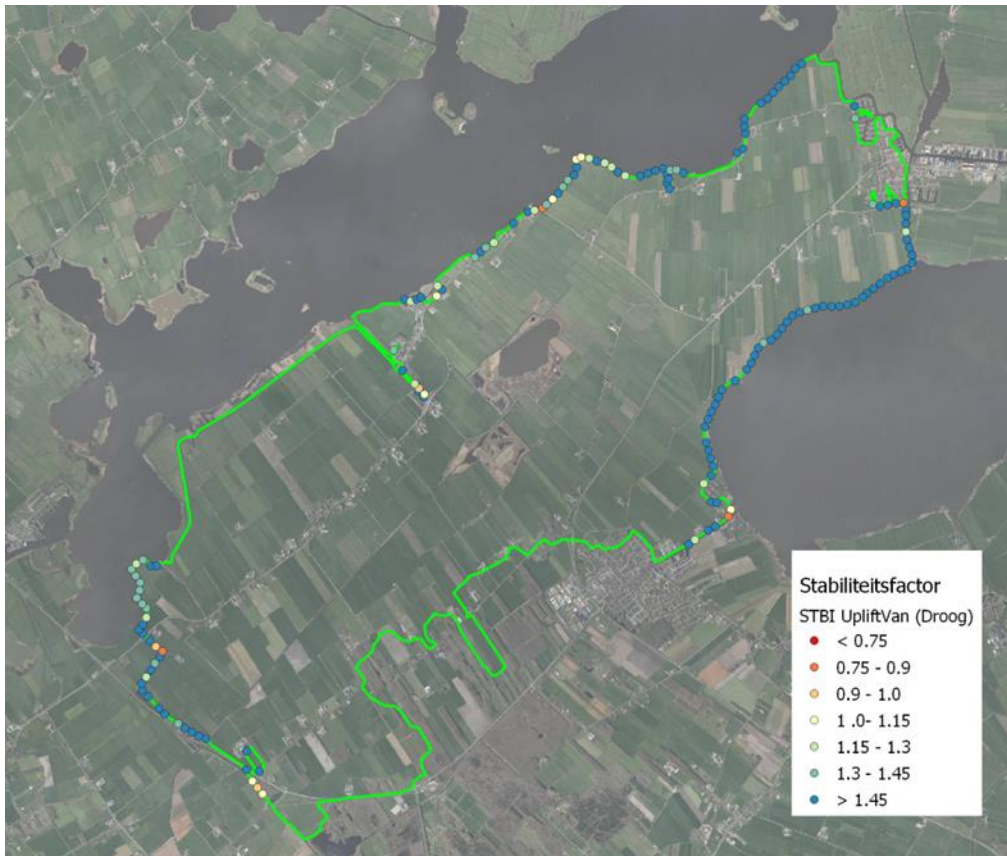


Figuur 3-4 Locaties promotor berekeningen met bijbehorende terugkeertijd (Rinsum van G.P., 2022)

In 2016 is door Wetterskip Fryslân een beoordeling op stabiliteit uitgevoerd met DAM. De berekeningen zijn geautomatiseerd doorgerekend en per rekenlocatie zijn in sommige gevallen tientallen berekeningen beschikbaar. Er is gevarieerd in ondergrondscenario's, droge- en natte omstandigheden en verschillende rekenparameters (Bosma, 2014). De resultaten voor de natte (hoogwater) en droge situatie zijn weergegeven in Figuur 3-5 en Figuur 3-6. Droge omstandigheden zijn bij veendijken relevant en kunnen een significante bijdrage leveren aan de overstromingskans. Het is echter duidelijk zichtbaar dat de natte situatie in bijna alle gevallen leidt tot een lagere stabiliteitsfactor. De rekenresultaten op locaties waar tussen 2018 en 2020 is versterkt zijn niet meer actueel. De huidige situatie komt niet meer overeen met de rekenresultaten.



Figuur 3-5 Locaties stabiliteitsberekeningen met bijbehorende stabiliteitsfactor (natte scenario)



Figuur 3-6 Locaties stabiliteitsberekeningen met bijbehorende stabiliteitsfactor (droge scenario)

Pilotstudie normering regionale kering

In 2022 is door Witteveen+Bos de kadering beschouwd in de pilotstudie 'Boezemkade – landelijk gebied'. Hier zijn vijf onderwerpen uitgewerkt in het kader van het onderzoek naar de normering van regionale keringen. Deze vijf onderwerpen zijn schadeberekeningen, systeemmaatregelen, maatgevende eisen beheer & onderhoud, berekening van overstromingskansen en kosten-batenanalyse van een dijkversteking.

4 Toepassing

4.1 Resultaten Hoogte

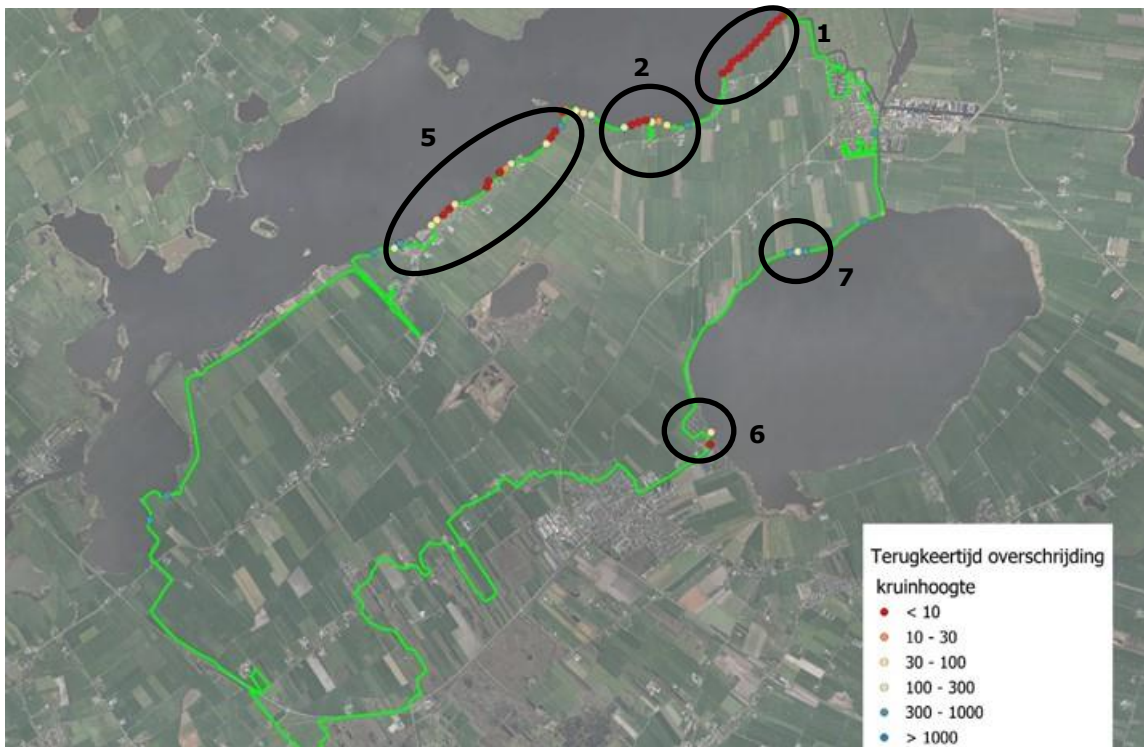
De faalkans als gevolg van het faalmechanisme hoogte (GEKB) is berekend gebruik makend van de software PROMOTOR. In §4.1.1 zijn de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans geïnventariseerd en, waar nodig, geactualiseerd. In §4.1.2 zijn faalkansen voor de maatgevende doorsnedes bepaald. In plaats van faalkansen op basis van een deterministisch kritiek overslagdebiet, zijn faalkansen op basis van een kansverdeling voor het kritieke overslagdebiet bepaald. Tenslotte zijn in §4.1.3 de resultaten gecombineerd tot faalkansen voor de maatgevende doorsnede(n) in de strekkingen en zijn de relaties tussen strekkingen bepaald aan de hand van het type water en het type maatgevende belasting.

4.1.1 Keuze maatgevende locaties en vakken

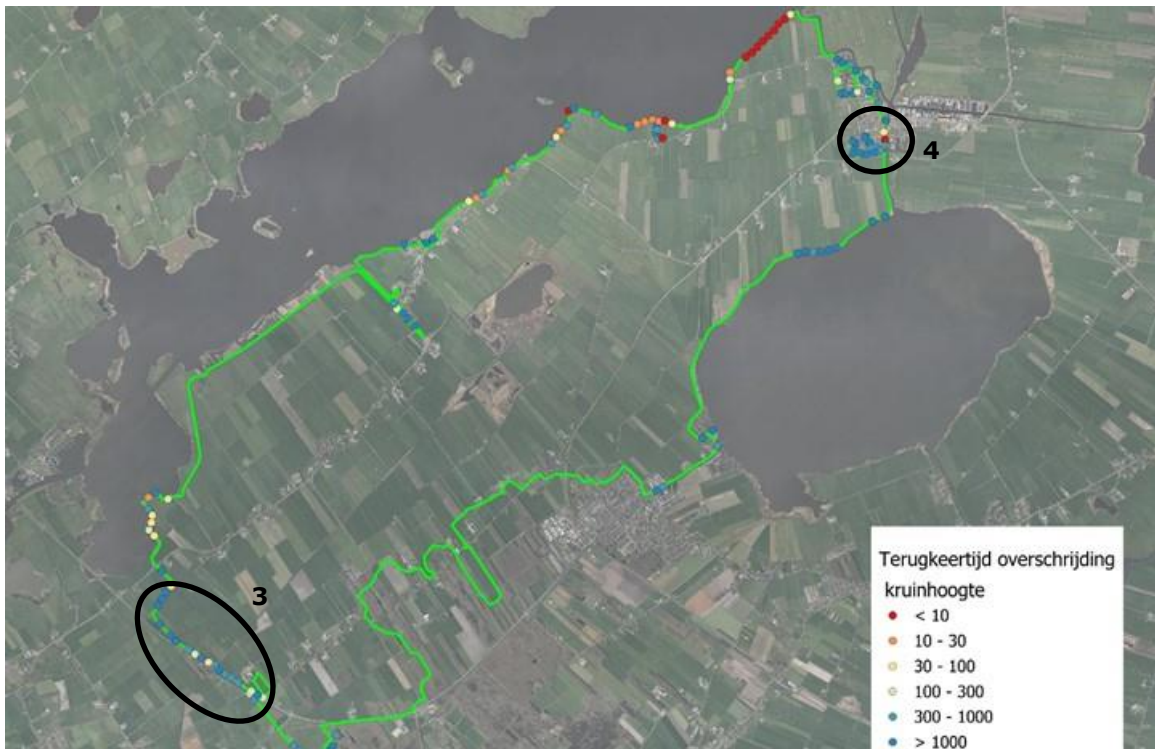
Op basis van eerdere toetsingen van de kadering is een inventarisatie gemaakt van de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans van de polder. In 2022 en 2015 is de hoogte van de kadering getoetst, met behulp van PROMOTOR sommen, bij een vast kritiek overslagdebiet van 1l/s/m. Het resultaat is per locatie/doorsnede een frequentie (per jaar) dat een overslagdebiet van 1l/s/m overschreden wordt. Deze overschrijdingsfrequentie moet niet worden verward met een faalkans, omdat bij 1 l/s/m golfoverslag niet per definitie dijkfalen te verwachten is. Voor de voorbeelduitwerking is verondersteld dat de locaties met de grootste overschrijdingsfrequentie van het kritiek overslagdebiet het meest bijdragen aan de overstromingskans van de polder.

Figuur 4-1 en Figuur 4-2 tonen de resultaten (in terugkeertijd) van de toetsingen van 2022 en 2015. Alleen de locaties met een terugkeertijd kleiner dan 1000 jaar (dus een overschrijdingsfrequentie groter dan eens per 1000 jaar) zijn getoond. Op basis hiervan zijn de volgende strekkingen nader beschouwd:

- Strekking 1 in het noordoosten, langs het Hegemeer, waar de overschrijdingsfrequentie van 1l/s/m vrijwel over de gehele strekking eens per jaar bedraagt;
- Strekking 2 in het noorden, langs het Hegemeer, waar de overschrijdingsfrequentie van 1l/s/m varieert tussen eens per 5 en eens per 20 jaar;
- Strekking 3 langs de (fictieve) regionale rivier, waar de grootste overschrijdingsfrequenties in de toetsing ca. eens per 100 jaar bedragen. Voor de berekeningen van de regionale rivier is fictieve waterstandsstatistiek gebruikt (zie Bijlage A.3).
- Strekking 4 langs de boezem bij Woudsend, waar de grootste overschrijdingsfrequentie van 1l/s/m eens per 170 jaar bedraagt.
- Strekking 5 in het noorden, langs het Fluessen meer, waar de overschrijdingsfrequentie van 1l/s/m varieert tussen eens per 1 en eens per 40 jaar;
- Strekking 6 langs het Slotermeer, waar zich twee locaties bevinden met een relatief hoge overschrijdingsfrequentie van 1l/s/m: van eens per 1 en eens per 70 jaar;
- Strekking 7 langs het Slotermeer, waar de overschrijdingsfrequentie van 1l/s/m varieert tussen eens per 170 en eens per 740 jaar.



Figuur 4-1 Overzicht van de strekkingen met de grootste bijdrage aan de overstromingskans van de polder. De getoonde locaties en resultaten volgen uit de toetsing van 2022.



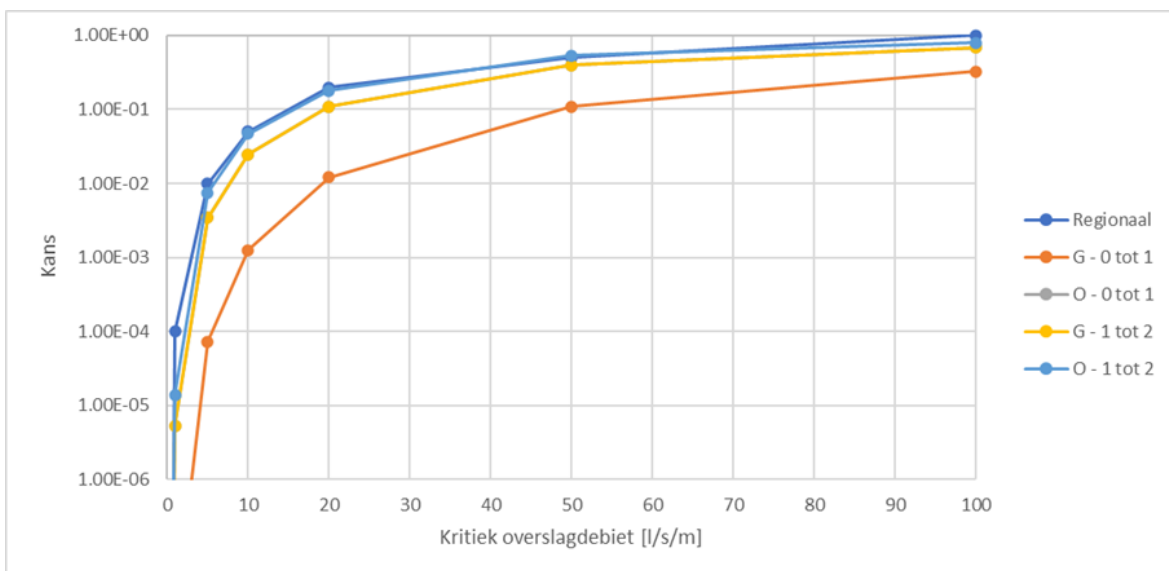
Figuur 4-2 Overzicht van de strekkingen met de grootste bijdrage aan de overstromingskans van de polder. De getoonde locaties en resultaten volgen uit de toetsing van 2015.

4.1.2 Doorsnedekans

Voor de bepaling van de faalkans van de dijk door overloop of overslag van water (ook wel 'hoogte') zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Elk van de hierboven beschreven strekkingen is beschouwd. Voor elke strekking is de maatgevende doorsnede opnieuw doorgerekend in PROMOTOR.
- Voor elke strekking is geverifieerd of de schematisering uit de toetsing van 2022 (dan wel 2015) nog geldig is. Zo niet, is deze aangepast.
- In deze uitwerking is niet gerekend met een vast kritiek overslagdebiet. In plaats daarvan is voor een range aan overslagdebieten met PROMOTOR de (jaarlijkse) overschrijdingskans bepaald (per doorsnede/locatie). Dit leidt tot een kansverdeling van het overslagdebiet per berekende doorsnede.
- Bovenstaande kansverdeling is gecombineerd met een kansverdeling van het kritiek overslagdebiet (m.a.w. de kans dat een bepaald overslagdebiet tot falen leidt). Vermenigvuldigen en uitintegreren van beide verdelingen leidt tot de faalkans per jaar.
- De kansverdeling van het kritiek overslagdebiet is getoond in Tabel 4-1 en Figuur 4-3 (in blauw). Dit is een geschatte verdeling, die een bovengrens (conservatief) geeft van de bekende kansverdelingen van het kritiek debiet (WBI 2017c). Temeer omdat de golfhoogtes voor regionale keringen doorgaans een stuk lager zullen zijn dan voor primaire keringen. Figuur 4-3 illustreert dit (G en O betekent gesloten of open zode, de getallen geven de golfklasse 0-1m of 1-2m aan). Deze geschatte kansverdeling kan locatie specifiek gemaakt worden op basis van relevante kenmerken (zoals taludhelling, kwaliteit bekleding, golfhoogtes, etc.), maar hier is nog geen eenduidige handreiking voor beschikbaar.

Iedere strekking is geanalyseerd en voorzien van duiding in Bijlage A. In Tabel 4-2 zijn de resulterende doorsnedekansen per strekking (of locatie) samengevat.



Figuur 4-3 Geschatte kansverdeling van het kritiek overslagdebiet ('Regionaal') vergeleken met de kansverdelingen uit WBI2017 voor open en gesloten zode ('O' en 'G') en golfhoogteklasse 0-1m en 1-2m.

Tabel 4-1 Geschatte kansverdeling van het kritiek overslagdebiet voor gebruik in de voorbeelduitwerking

Overslagdebiet [l/s/m]	0,1	1	5	10	20	50	100
Conditionele faalkans	0	0,0001	0,01	0,05	0,2	0,5	1,0

Tabel 4-2 Overzicht doorsnedekansen hoogte per strekking

Strekking	Jaarlijkse faalkans
Strekking 1	1/298.000
Strekking 2	1/169.000
Strekking 3	1/1.900
Strekking 4	1/1.950
Strekking 5 – versterkt deel	1/45.500
Strekking 5 – niet versterkt deel	1/920
Strekking 6	1/67.000
Strekking 7	1/21.500

4.1.3 Vak- en trajectkans

Voor de maatgevende doorsnedes van de bepalende strekkingen van de kering is de faalkans op hoogte bepaald. Bij het faalmechanisme hoogte is er nauwelijks sprake van lengte-effect binnen een dijkstrekking met een uniforme oriëntatie, waardoor kan worden gesteld dat faalkans op hoogte voor een strekking gelijk is aan de faalkans van de maatgevende doorsnede. Hieronder volgen de overwegingen voor het combineren van de faalkansen van de verschillende strekkingen op basis van het type watersysteem.

Strekkingen 1, 2 en 5 (Fluessen meer en Heegermeer)

Strekkingen 1, 2 en 5 (zowel het versterkte als het niet versterkte deel) liggen allemaal langs het Fluessen meer (en Heegermeer). Bij al deze strekkingen is een zware NW-storm nodig om tot falen te kunnen leiden, waardoor ze een hoge mate van correlatie hebben.³ Daarom kan de faalkans van dit hele deel van de kadering gelijk gesteld worden aan de hoogste faalkans van de afzonderlijke strekkingen. Dit komt neer op een faalkans van 1/920 per jaar, bepaald door het niet versterkte deel van strekking 5. Het versterkte deel van strekking 5 heeft een faalkans van 1/45.500 per jaar.

Strekking 3 (regionale rivier) en strekking 4 (boezem Woudsend)

Strekkingen 3 en 4 liggen langs de regionale rivier in het zuidwesten van de kadering (strekking 3) en de boezem bij Woudsend in het noordoosten (strekking 4). Voor beide strekkingen wordt de faalkans bepaald door overloop, waardoor de waterstandstatistiek bepalend is. De faalkansen zijn respectievelijk 1/1.900 en 1/1.950 per jaar voor strekkingen 3 en 4.

Strekkingen 6 en 7 (Slotermeer)

Strekkingen 6 en 7 liggen langs het Slotermeer. Strekking 6 is het falen door overloop maatgevend, met een faalkans van 1/67.000 per jaar. Bij strekking 7 is een ZZW-storm nodig om tot falen op hoogte te leiden, met een faalkans van 1/21.500 per jaar. Dit zijn twee verschillende belastingsituaties voor hetzelfde watersysteem.

³ De zware NW storm volgt uit de hoofdillustratiepunten berekend met Promotor. Het uitgangspunt hierbij is dat het hoofdillustratiepunt behorend bij een windrichting en gerelateerde waterstand duidelijk maatgevend is ten opzichte van andere windrichtingen/stormen. Indien meerdere onafhankelijke stormen (bijvoorbeeld NW en ZZW) ongeveer evenveel bijdragen, moet voor iedere significant bijdragende storm de faalkans vastgesteld worden waarna de totale faalkans benaderd kan worden door de faalkansen van de stormen op te tellen (uitgaande dat de stormen onderling onafhankelijk zijn).

Trajectkans

Hieronder volgen de overwegingen van het combineren van de faalkansen van de bepalende strekkingen tot een totale faalkans op hoogte voor de gehele polder:

- De strekkingen 1, 2 en 5 langs het Fluessen meer (en Heegermeer) zijn als volledig afhankelijk te beschouwen omdat voor al deze strekkingen namelijk een NW-storm nodig is voor dijkfalen. Voor geen van de andere strekkingen geldt dit. De strekkingen langs het Fluessen meer (en Heegermeer) zijn daarom onafhankelijk van de overige strekkingen.
- Voor strekking 7 is een ZZW-storm bepalend. Dit is voor geen van de andere strekkingen het geval. Strekking 7 is daarom onafhankelijk van de overige strekkingen.
- Strekking 4 ligt aan de boezem bij Woudsend, en verbindt het Heegermeer met het Slotermeer. Voor strekking 6 is de waterstand op het Slotermeer bepalend, en is dus in enige mate gecorreleerd met strekking 4. Een hoge boezemwaterstand is waarschijnlijk in enige mate gecorreleerd met een hoge waterstand op het meer. Omdat de correlatie onbekend is, en de bandbreedte tussen volledige afhankelijkheid en onafhankelijkheid beperkt is⁴, is er uitgegaan van de maximale kans van 1/1.900 per jaar (grofweg de som van de afzonderlijke kansen).
- Voor strekking 3 is de waterstand op de regionale rivier bepalend, waardoor de rivierafvoer van belang is. Daarnaast blijkt uit de berekeningen dat voor strekking 3 de waterstand bepalend is. De rivierafvoer is als onafhankelijk beschouwd van de overige watersystemen, waardoor ook strekking 3 onafhankelijk is van de overige strekkingen.

Bovenstaande overwegingen zijn samengevat in Tabel 4-3. De totale faalkans op hoogte wordt bepaald door de combinatie van strekking 1, 2 en 5 met een gezamenlijke faalkans van 1/920, de combinatie van strekking 4 en 6 met een gezamenlijke faalkans van 1/1.900, strekking 3 met een faalkans van 1/1.900 en strekking 7 met een faalkans van 1/21.500. Deze combinaties zijn allen onafhankelijk van elkaar, waardoor de faalkans voor de gehele polder resulteert uit het onafhankelijk bij elkaar optellen (grofweg de som van de afzonderlijke kansen). De trajectkans is;

- $P_{f_{\text{traject KR103}}} = 1 - (1 - 1/920) * (1 - 1/1.900) * (1 - 1/1.900) * (1 - 1/21.500) \approx \mathbf{1/460}$
- $P_{f_{\text{traject KR103}}} \approx 1/920 + 1/1.900 + 1/1.900 + 1/21.500 \approx \mathbf{1/460}$

Tabel 4-3 Gecombineerde faalkansen op basis van de afzonderlijke strekkingen

Strekking	Faalkans strekking	Maatgevende belastingtype	Gecombineerde faalkans
Strekking 1	1/298.000	NW storm	1/920
Strekking 2	1/169.000	NW storm	
Strekking 5 – versterkt deel	1/45.500	NW storm	
Strekking 5 – niet versterkt deel	1/920	NW storm	
Strekking 4	1/1.950	Overloop (boezemstatistiek)	1/1.900
Strekking 6	1/67.000	Overloop (Meerpeilstatistiek)	
Strekking 3	1/1.900	Overloop (Rivierstatistiek)	1/1.900
Strekking 7	1/21.500	ZZW storm	1/21.500

⁴ De gecombineerde faalkans van strekking 4 en 6 bedraagt 1/1.950 per jaar (hoogste afzonderlijke kans) bij volledige afhankelijkheid, en 1/1.900 per jaar (grofweg de som van de afzonderlijke kansen) bij volledige onafhankelijkheid. De werkelijke gecombineerde kans ligt tussen deze bandbreedte.

4.2 Resultaten Stabiliteit

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts (STBI) is berekend, gebruik makend van de software D-Stability. In §4.2.1 zijn de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans geïnventariseerd. Deze strekkingen zijn eenvoudig af te leiden uit de eerdere toetsresultaten. In §4.2.2 zijn faalkansen voor de maatgevende doorsnede(n) bepaald. De faalkansen zijn per locatie conditioneel op een negental belastingscenario's afgeleid. Tenslotte zijn in §4.2.3 de resultaten gecombineerd tot faalkansen voor de maatgevende doorsnede(n) in de strekkingen.

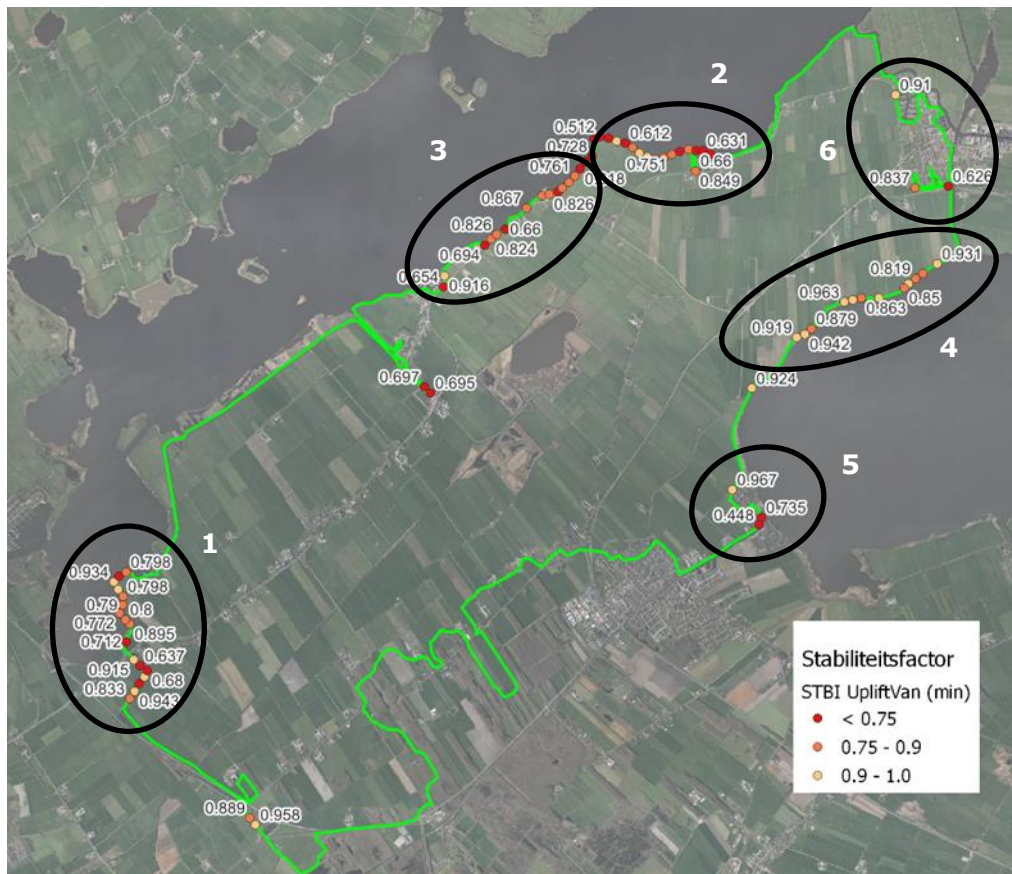
4.2.1 Keuze maatgevende locaties en vakken

Op basis van eerdere toetsingen van de kadering is een inventarisatie gemaakt van de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans van de polder voor binnenwaartse stabiliteit. In 2022 en 2014 is de kadering getoetst op stabiliteit. Dit betrof in 2014 een semi-probabilistische toets, met een stabiliteitsfactor als resultaat. Voor deze voorbeelduitwerking is verondersteld dat de locaties met de laagste stabiliteitsfactor het meest bijdragen aan de overstromingskans van de polder. In de toetsresultaten zijn berekende veiligheidsfactoren getoetst aan een schadefactor van 0,9. In het kader van deze studie is een conservatieve keuze gemaakt om toetsresultaten met veiligheidsfactoren $> 1,0$ als veilig te beschouwen.

Onderstaand Figuur 4-4 toont per doorsnede de laagst berekende stabiliteitsfactor (van de verschillende scenario's) uit de toetsing van 2014. Alleen de locaties met stabiliteitsfactor kleiner dan 1 zijn getoond. Op basis hiervan zijn de volgende bepalende strekkingen beoordeeld:

- Strekking 1 in het zuidwesten van de kadering, langs de regionale rivier, met een minimale stabiliteitsfactor van 0,68.
- Strekking 2 in het noorden van de kadering, langs het Heegermeer, met een minimale stabiliteitsfactor van 0,44.
- Strekking 3 in het noorden van de kadering, langs het Fluessen meer, met een minimale stabiliteitsfactor van 0,62.
- Strekking 4 van de kadering langs de noordrand van het Slotermeer, met een minimale stabiliteitsfactor van 0,82.
- Strekking 5 van de kadering langs de westrand van het Slotermeer, met een minimale stabiliteitsfactor van 0,45.
- Strekking 6 van de kadering langs de boezem genaamd Woudsend, met een minimale stabiliteitsfactor van 0,91.

Voor deze zes strekkingen met een stabiliteitsfactor $< 1,0$ is ook de gevoeligheid voor de ondergrondscenario's onderzocht. Bij verschillende (gunstige en ongunstige) ondergrondscenario's blijven de stabiliteitsfactoren voor deze locaties relatief laag ten opzichte van het gehele traject. Dit betekent dat ongeacht de ondergrondscenario's, bovenstaande strekkingen de laagste stabiliteit hebben binnen de kadering, en daarmee bepalend zijn voor de overstromingskans van de polder voor het faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts.



Figuur 4-4 Locaties stabiliteitsfactor onder 1.0 uit de toetsing van 2015.

4.2.2 Doorsnedekans

Voor de bepaling van de faalkans op binnenwaartse stabiliteit is voor elke van de zes strekkingen de maatgevende locatie gekozen. Voor deze locatie is een probabilistische berekening gemaakt met D-Stability (Mohr-Coulomb sterktemodel). De probabilistische berekeningen zijn gemaakt aan de hand van 3D-fragility curves⁵. Verondersteld is dat de freatische lijn (door buitenwaterstand of neerslag) en de verkeerslast de drijvende belastingen zijn voor binnenwaartse stabiliteit. Deze belastingen zijn als variabele belastingen in de 3D-fragility curves gehanteerd;

- Voor de verkeersbelasting is uitgegaan van drie scenario's/belastinggevallen:
 - Een dagelijkse verkeerslast van 1kPa, met een frequentie van eens per dag;
 - Een zware verkeerslast van 5kPa, met frequentie van eens per jaar tot eens per dag afhankelijk van het soort weg dat op de kering aanwezig is;
 - Een zeer zware verkeerslast van 13kPa⁶, met een frequentie van eens per 10 jaar.
- Voor de freatische lijn is uitgegaan van drie scenario's/belastinggevallen:
 - FL2: Een jaarlijks maximum, waarbij de freatische lijn op streefpeil ligt (zowel ter plaatse van de buiten- als binnenkruinlijn). Dit scenario heeft een frequentie van eens per jaar;
 - FL4: Een volledig verzadigde dijk, waarbij de freatische lijn op 10cm het dijkprofiel volgt. De frequentie van dit scenario wordt bepaald door of een T=100 jaar neerslag bui, ofwel door 10l/s/m overslag (en infiltrerend water).

⁵ Een 3D-fragility curve geeft de conditionele faalkans gegeven een combinatie van twee variabele belastingen.

⁶ De grootte van de verkeersbelasting bedraagt 13kPa over een strookbreedte van 2,5 m [TRWG 2001]. Indien zich op een kering een verkeersweg bevindt waarop zwaar verkeer is toegestaan (verkeersklasse 60) dient een belasting van 15kPa over een strookbreedte van 2,5 m te worden gehanteerd [HCO 1994]. Indien dergelijk zwaar verkeer tijdens de maatgevende hoogwatersituatie niet is toegestaan, volstaat een verkeersbelasting van 13kPa (STOWA, 2009).

- FL3: Een half verzadigde dijk, waarbij de freatische lijn midden tussen FL2 en FL4 in ligt. De frequentie van dit scenario wordt bepaald door of een T=10 jaar neerslag bui, ofwel door 1l/s/m overslag (en infiltrerend water).

Voor het opstellen van de 3D-fragility curve wordt voor elke mogelijke combinatie van freatische lijn en verkeerslast (in totaal 9 combinaties) de conditionele faalkans bepaald. Vervolgens worden deze conditionele kansen gecombineerd met de kansen van optreden van de belastingen, en het geheel wordt uitgeïntegreerd tot een totale faalkans (per jaar) per locatie (zie ook Bijlage B).

Iedere strekking is geanalyseerd en voorzien van duiding in Bijlage B. In Tabel 4-4 zijn de resulterende doorsnedekansen per strekking samengevat. In de middelste kolom is de uitkomst van de 3D-fragility curve gegeven. Indien wordt getoetst met een verkeersbelasting van 13 kPa (VB=13), dan reduceert de 3D naar een 2D-fragility curve (er resteren 3 belastingcombinaties). Dit is weergegeven in de linker kolom. In de rechter kolom is aanscherping van de maatgevende belastingcombinatie in de 3D-fragility curve toegevoegd door uitwerking van een faalpad. In een faalpad zijn de kansen op vervolgprocessen afgeleid.

Sinds de toetsing van 2015 zijn een aantal strekkingen versterkt, waarbij de kruin is opgehoogd en het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 binnentalud. Van deze strekkingen zijn de faalkansen als verwaarloosbaar (FV) beschouwd. In Figuur 7-1 Versterkte strekkingen zijn de versterkte strekkingen (waaronder strekking 2) weergegeven.

Tabel 4-4 Overzicht doorsnedekansen stabiliteit per strekking

Strekking	Maatgevende faalkans (VB=13)	Jaarlijkse faalkans	Jaarlijkse faalkans (aanscherping)
Strekking 1 – versterkt deel	n.v.t.	FV	n.v.t.
Strekking 1 – niet versterkt deel	1/20	1/750	1/99.000
Strekking 2	FV	FV	n.v.t.
Strekking 3 – versterkt deel	n.v.t.	FV	n.v.t.
Strekking 3 – niet versterkt deel	1/90	1/4.400	1/4.400
Strekking 4	1/30	1/630	1/200.000
Strekking 5	1/5	1/10	1/90.600
Strekking 6	FV	FV	n.v.t.

De faalkans voor strekkingen 1, 4 en 5 worden bepaald door hevige neerslag en de verkeerslast. Voor de faalkans van strekking 3 is overslag als gevolg van NW storm (i.c.m. verkeerslast) bepalend. Streckingen 2 en 6 hebben een verwaarloosbare faalkans ten opzichte van de overige strekkingen. Tabel 4-4 laat zien dat aanscherping van de jaarlijkse faalkans veel impact heeft wanneer een neerslagscenario i.c.m. de verkeerslast bepalend is voor het maatgevende glijvlak. Dan is namelijk aanscherping met een faalpad mogelijk door gevolgmechanismen (eroderen restprofiel) die door overloop en/of overslag worden bepaald mee te nemen. Dit is nader uitgewerkt in Bijlage B.

Verder heeft ook de manier waarop de waterspanningen in/onder de dijk worden geschematiseerd impact op de jaarlijkse faalkans. Resultaten voor het 'bol' scenario zijn opgenomen in deze studie, het 'hol' scenario is niet maatgevend maar de keuze hierin heeft wel invloed op de faalkans op doorsnedeniveau. Dit is verder toegelicht in onderstaand tekstblok.

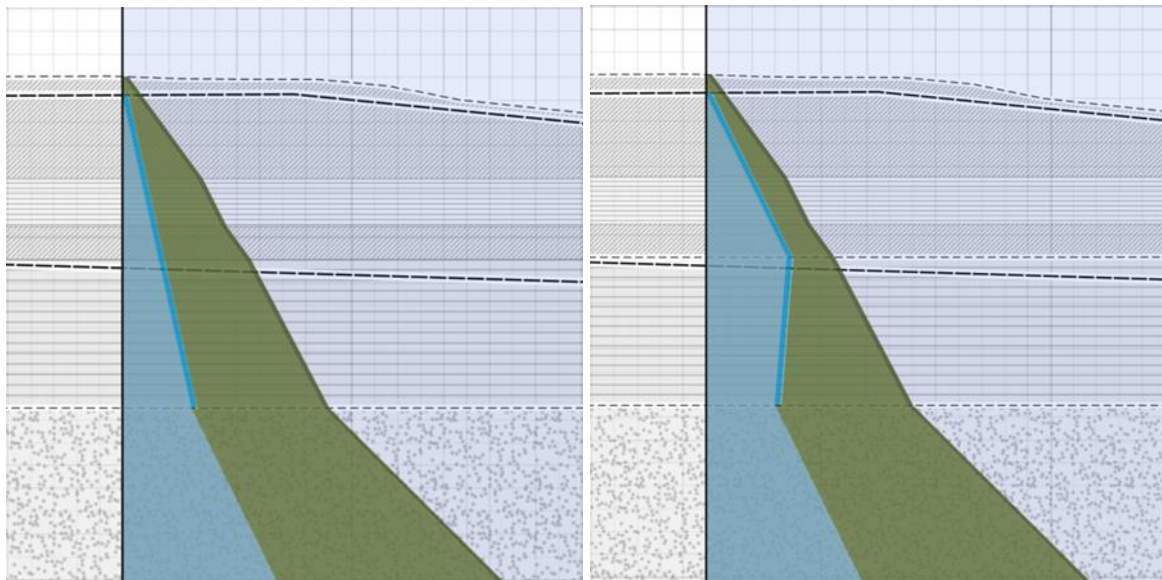
Freatische lijn ('hol' en 'bol')

Voor een probabilistische faalkansberekening van macro-instabiliteit binnenwaarts is de schematisatie van de ondergrondlagen, freatische lijn en ondergrondparameters relevant. Dit heeft een grote invloed op de berekende stabiliteitsfactoren en faalkansen. Hier wordt kort uitgelicht dat de onzekerheid rondom de faalkansen op doorsnedeniveau uiteen lopen voor de keuze van de schematisatie van de freatische lijn.

In deze studie is de freatische lijn voor drie scenario's geschematiseerd. Een van de scenario's is een volledig verzadigde dijk, waarbij de freatische lijn op 10cm het dijkeprofiel volgt (FL4). De frequentie van dit scenario wordt bepaald door of een T=100 jaar neerslag bui, ofwel door 10l/s/m overslag (en infiltrerend water). De freatische lijn kan dan als een 'hol' of 'bol' verloop geschematiseerd worden. Dit is geïllustreerd in Figuur 4-5.

Bij het holle scenario is een hydrostatisch verloop van de waterspanningen aangenomen tot aan het watervoerend pakket (onderkant deklaag). Bij het bolle scenario is een hydrostatisch verloop van de waterspanningen aangenomen tot aan de dijkbasis (bovenkant deklaag). Er is nog veel onzekerheid of de indringing in de deklaag wordt gedomineerd vanuit de dijk kern of vanuit het watervoerend pakket. In het ene geval zal een hol en in het andere zal een bol scenario representatief zijn.

De probabilistische faalkansen (per jaar) verschillen met een factor 3-30. Voor strekking 3 is de faalkans 1/4.400 (bol FL) en 1/10.000 (hol FL). Voor strekking 4 bedraagt de faalkans 1/630 (bol FL) en 1/24.000 (hol FL). Voor strekking 5 is de faalkans 1/10 (bol FL) en 1/355 (hol FL). De invloed van deze scenario's zijn sterk afhankelijk van de vorm en afmeting van het glijvlak. Het glijvlak dient door de grondlaag te gaan waarin de waterspanning verandert door een 'hol' of 'bol' scenario, anders resulteren dergelijk scenario's niet tot veranderingen op de faalkansen.



Figuur 4-5 Schematisatie van de freatische lijn (links 'hol' en rechts 'bol' scenario)

4.2.3 Vak- en trajectkans

Voor de maatgevende doorsnedes van de gedefinieerde strekkingen van de kadering is de faalkans op macro-instabiliteit binnenwaarts bepaald. Bij het faalmechanisme macro-instabiliteit

binnenwaarts is er sprake van lengte-effect, waardoor kan worden gesteld dat faalkans voor een strekking groter wordt dan de faalkans van de maatgevende doorsnede (met toenemende lengte). Hieronder volgen de overwegingen van het afleiden van faalkansen op vakkniveau en combineren van de vakkansen tot een totale faalkans op trajectniveau voor de gehele polder:

Strekking 1

Strekking 1 in het westen, langs de fictieve rivier, heeft een lengte van orde 1,9 kilometer. Dit valt onder te verdelen in 37 (homogeen onafhankelijke) elementen van 50 meter (KPR, 2017).

Wanneer de maatgevende faalkans wordt toegekend aan al deze elementen (meest conservatieve benadering) bedraagt de vakkans:

- $Pf_{\text{strekking1}} = 1 - (1 - 1/99.000)^{37} \approx 1/2.700$

Echter is een significant deel van deze strekking 1 versterkt waardoor de faalkans van dat deel als verwaarloosbaar kan worden gesteld. Dit versterkte deel heeft een lengte van 750 meter (oftewel 15 elementen). De vakkans wordt hierdoor:

- $Pf_{\text{strekking1}} = 1 - ((1 - 1/99.000)^{22} * (1 - FV)^{15}) \approx \mathbf{1/4.500}$

In het fictieve geval dat de één na maatgevende doorsnede wordt doorgerekend waar een faalkans van 1/200.000 per jaar resulteert, kan de vakkans als volgt worden aangescherpt:

- $Pf_{\text{strekking1}} = 1 - ((1 - 1/99.000)^1 * ((1 - 1/200.000)^{21} * (FV)^{15})) \approx 1/8.700$

Hier is aan één element een faalkans van 1/99.000 en aan 21 elementen een faalkans van 1/200.000 toegekend. De verwaarloosbare faalkans voor 15 elementen blijft ongewijzigd.

Strekking 3

Strekking 3 in het noorden, langs het Fluessen meer, heeft een lengte van orde 1,6 kilometer. Dit valt onder te verdelen in 32 (homogeen onafhankelijke) elementen van 50 meter (KPR, 2017).

Wanneer de maatgevende faalkans wordt toegekend aan al deze elementen (meest conservatieve benadering) bedraagt de vakkans:

- $Pf_{\text{strekking3}} = 1 - (1 - 1/4.400)^{32} \approx 1/140$

Echter is een significant deel van deze strekking 3 versterkt waardoor de faalkans als verwaarloosbaar wordt gesteld. Dit versterkte deel heeft een lengte van 850 meter (oftewel 17 elementen). De vakkans wordt hierdoor:

- $Pf_{\text{strekking3}} = 1 - ((1 - 1/4.400)^{15} * (1 - FV)^{17}) \approx \mathbf{1/295}$

In het fictieve geval dat de één na maatgevende doorsnede wordt doorgerekend waar een faalkans van 1/5.000 per jaar resulteert, kan de vakkans als volgt worden aangescherpt:

- $Pf_{\text{strekking3}} = 1 - ((1 - 1/4400)^1 * ((1 - 1/5000)^{14} * (FV)^{17})) \approx 1/330$

Hier is aan één element een faalkans van 1/4.400 en aan 14 elementen een faalkans van 1/5.000 toegekend. De verwaarloosbare faalkans voor 17 elementen blijft ongewijzigd.

Strekking 4

Strekking 4 langs de noordrand van het Slotermeer, heeft een lengte van orde 1,9 kilometer. Dit valt onder te verdelen in 38 (homogeen onafhankelijke) elementen van 50 meter (KPR, 2017).

Wanneer de maatgevende faalkans wordt toegekend aan al deze elementen (meest conservatieve benadering) bedraagt de vakkans:

- $Pf_{\text{strekking4}} = 1 - (1 - 1/200.000)^{38} \approx 1/5.300$

Echter is voor een significant deel van deze strekking 4 de stabiliteitsfactor groter dan 1. In deze studie wordt de faalkans als verwaarloosbaar verondersteld ten opzichte van de maatgevende doorsnede. Dit bedraagt een lengte van 600 meter (oftewel 12 elementen). De vakkans bedraagt:

- $Pf_{\text{strekking4}} = 1 - ((1 - 1/200.000)^{26} * (1 - FV)^{12}) \approx \mathbf{1/7.700}$

In het fictieve geval dat niet 600 maar 1200 meter een verwaarloosbare faalkansbijdrage heeft, kan de vakkans als volgt worden aangescherpt:

- $Pf_{\text{strekking4}} = 1 - ((1 - 1/200.000)^{14} * (1 - FV)^{24}) \approx 1/14.250$

Hier is aan 14 elementen een faalkans van 1/200.000 en aan alle overige elementen een verwaarloosbare faalkans toegekend.

Strekking 5

Strekking 5 langs de westrand van het Slotmeer loopt langs de gehele haven. Dit heeft een lengte van orde 300 meter. Dit valt onder te verdelen in 6 (homogeen onafhankelijke) elementen van 50 meter. Wanneer de maatgevende faalkans wordt toegekend aan al deze elementen (meest conservatieve benadering) bedraagt de vakkans:

- $Pf_{\text{strekking5}} = 1 - (1 - 1/90.600)^6 \approx \mathbf{1/15.100}$

De vakkansen voor macro-instabiliteit binnenwaarts zijn samengevat in onderstaande Tabel 4-5.

Tabel 4-5 Faalkansen op basis van de afzonderlijke strekkingen

Strekking	Maatgevende belastingtype	Faalkans strekking (incl. aanscherping)
Strekking 1	Neerslag	1/4.500
Strekking 2	n.v.t.	FV
Strekking 3	NW storm	1/295
Strekking 4	Neerlag	1/7.700
Strekking 5	Neerslag	1/15.100
Strekking 6	n.v.t.	FV

Trajectkans

Met faalkans van alle strekkingen kan een trajectkans voor het faalmechanisme stabiliteit worden afgeleid. Gezien de strekkingen ver uit elkaar liggen en de ondergrond niet homogeen is, worden de vakken onafhankelijk bij elkaar opgeteld (grotweg de som van de afzonderlijke kansen). Dit resulteert in een trajectkans:

- $Pf_{\text{traject KR103}} = 1 - (1 - 1/4.500) * (1 - 1/295) * (1 - 1/7.700) * (1 - 1/15.100) \approx \mathbf{1/265}$
- $Pf_{\text{traject KR103}} \approx 1/4.500 + 1/295 + 1/7.700 + 1/15.100 \approx \mathbf{1/265}$

De polders die omsloten worden door de kadering bestaan voornamelijk uit veengronden. Richting het zuidelijke deel van de polder verandert de ondergrond langzaam naar zand en de hoge gronden van het Gaasterland (zie Figuur 3-2). Er is daarom wellicht wel correlatie aanwezig dan nu is verondersteld (onafhankelijkheid per 50m) tussen de verschillende vakken in het noorden en het zuiden van de kadering. Het verschil is echter gering, zelfs als alle strekkingen als volledig gecorreleerd worden beschouwd reduceert de trajectkans voor macro-instabiliteit binnenwaarts tot 1/295 per jaar (maximale faalkans van de strekkingen).

4.3 Resultaten Piping

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme piping (STPH) is berekend gebruik makend van een probabilistische piping module (Python script). Deze module berekent fragility curves voor de deelfaalmechanismen heave, uplift en terugschrijdende erosie (piping). In §4.3.1 zijn de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans geïnventariseerd en zijn de bijbehorende doorsnedes lokaal geschematiseerd. In §4.3.2 zijn faalkansen voor de maatgevende doorsnedes bepaald waarbij rekening is gehouden met de te verwachte intredeweerstand van boezem of meer. Tenslotte zijn in §4.3.3 de resultaten gecombineerd tot faalkansen voor de maatgevende doorsnede(n) in de strekkingen en zijn de relaties tussen strekkingen bepaald.

4.3.1 Keuze maatgevende locaties en vakken

Op basis van eerdere toetsingen van de kadering is een inventarisatie gemaakt van de strekkingen die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans voor piping van de polder. Dit is gedaan door de resultaten van de in 2016 uitgevoerde toetsing te gebruiken. In de toetsresultaten zijn (voor verschillende ondergrondscenario's en droog/nat scenario's) veiligheidsfactoren voor piping berekend, waarbij een veiligheidsfactor $> 1,2$ als veilig is beschouwd. In de toetsresultaten zijn berekende veiligheidsfactoren getoetst aan een schadefactor 1,2. In het kader van deze studie zijn daarom toetsresultaten met veiligheidsfactoren $> 1,2$ als veilig beschouwd.

In Figuur 4-6 is een overzicht te zien van de laagst berekende veiligheidsfactoren (van de verschillende scenario's) per locatie. Slechts vijf locaties hebben een veiligheidsfactor $< 1,2$.



Figuur 4-6 Laagst berekende veiligheidsfactoren per locatie voor de kadering. De kleur van de locatie weerspiegelt de veiligheidsfactor.

Op basis van de vijf locaties met een veiligheidsfactor $< 1,2$ zijn drie strekkingen gedefinieerd, zie Figuur 4-7. Voor de overige locaties is aangenomen dat de faalkans verwaarloosbaar is ten opzichte van deze vijf locaties.



Figuur 4-7 Berekeningen die in de eerdere toetsing een veiligheidsfactor < 1,2 hebben. De getallen geven het bereik over de ondergrondscenario's (min – max).

4.3.2 Doorsnedekans

Uit eerdere toetsingen en ervaringen met de toepassing van de piping regels (heave, uplift en terugschrijdende erosie) voor regionale keringen blijkt dat een te sterk vereenvoudigde schematisatie tot onrealistisch hoge faalkansen kan leiden (lees: kansen waarbij falen in het verleden al bijna zeker had moeten optreden, maar waarbij in de praktijk nog niet eens beginnend falen is waargenomen). Een voorbeeld van een te vereenvoudigde schematisatie is de kwelweglengte bepalen zonder de weerstand van het voorland en/of boezem in rekening te brengen.

Voor het verkrijgen van een (bovengrens)schatting van de faalkans voor piping zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd in de voorbeelduitwerking:

- Elk van de hierboven beschreven strekkingen is beschouwd en doorgerekend met behulp van de deelfaalmechanismen heave, uplift en piping (Sellmeijer);
- Uit de eerdere toetsing zijn de kenmerkende profielpunten overgenomen van de beschouwde profielen overgenomen. De actualiteit van deze punten is gecontroleerd met behulp van AHN4;
- Uit de eerdere toetsing zijn ook het laag en hoog polderpeil overgenomen. Omdat een hoog buitenwater maatgevend is voor piping, is aangenomen dat dit samenvalt met hoog polderpeil;
- Voor elke doorsnede in een strekking zijn de grondlagen en grondparameters ter plaatse van het profiel lokaal geschematiseerd met behulp van de aanwezige gegevens in DINOLOket;
- De kwelweglengte bestaat uit een basis (bijvoorbeeld de horizontale afstand tussen buitenteen en teensloot) plus een voorlandlengte als gevolg van een intredeweerstand van 10 meter (zie ook het kader hieronder);
- De onzekerheid van de stochasten is deels ingeschat op WBI2017 standaardwaardes, deels op basis van bereiken gegeven in DINOLOket en deels op basis van wat de geschatte meetfout zou kunnen zijn voor opgemeten lengtes;
- Voor elke doorsnede is een gecombineerde fragility curve afgeleid op basis van de piping deelfaalmechanismen heave, uplift en piping (Sellmeijer). Elk fragility punt (faalkans gegeven een waterstand) is berekend met FORM (First Order Reliability Method);
- De berekende fragility curves zijn uitgeïntegreerd tot een faalkans per jaar met behulp van een overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand (bepaald met PROMOTOR) nabij de doorsnede.

- Tijdsafhankelijkheid, bewezen sterkte, heterogeniteit van de ondergrond en andere schakels in het faalproces dan opbarsten, piping en heave zijn genegeerd.

Iedere strekking is geanalyseerd en voorzien van duiding in Bijlage C. In Tabel 4-6 zijn de resulterende doorsnedekansen voor de vijf locaties samengevat.

Intredeweerstand

Zonder intredeweerstand kunnen piping berekeningen langs meren, kanalen en/of boezems onrealistisch hoge faalkansen opleveren. In de meeste gevallen zal een afdekkende (slib)laag aanwezig zijn die als intredeweerstand zal fungeren. In het kader van deze voorbeelduitwerking is een berekening gemaakt voor een afdekkende laag van 20 centimeter met een doorlatendheid van 0,1m/dag.

Hierbij is de extra kwelweglengte berekend met behulp van formules uit het technisch rapport waterspanningen bij dijken (TRWD). Omdat de lengte van het 'voorland' in de TRWD formulering niet eenduidig opgegeven kan worden, is de extra kwelweglengte door de intredeweerstand gelijk gesteld aan de spreidingslengte van het voorland. Naar verwachting levert dit geen grote fout op, temeer ook omdat de hier opgevoerde intredeweerstand illustratief is.

Toepassing van deze formule resulteert voor profiel 203 (met gemiddelde watervoerende laag dikte en gemiddelde doorlatendheid) in een extra kwelweglengte van 10,6 meter. Dit kan ook doorsnede-afhankelijk bepaald worden en als stochast meegenomen worden, maar in het kader van deze voorbeelduitwerking is het meenemen van een intredeweerstand beperkt tot een deterministische waarde van 10 meter extra kwelweglengte voor elke doorsnede. Voor elke doorsnede is deze 10 meter ook fysiek aanwezig in de watergang aan de buitenzijde, waardoor plausibel is dat de volledige 10 meter inderdaad bij de kwelweglengte opgeteld mag worden.

Tabel 4-6 Overzicht doorsnedekansen piping per doorsnede (conservatief bepaald)

Strekking	Doorsnede	Jaarlijkse faalkans
Strekking A	054	1/10.700
Strekking B	203	1/3.400
	205	1/12.800
Strekking C	342	1/1,20E9
	347	1/1,04E8

4.3.3 Vak- en trajectkans

Voor de maatgevende doorsnedes van de gedefinieerde strekkingen van de kadering is de faalkans op piping bepaald. Bij het faalmechanisme piping is er sprake van lengte-effect, waardoor kan worden gesteld dat faalkans voor een strekking groter wordt dan de faalkans van de maatgevende doorsnede (met toenemende lengte). Hieronder volgen de overwegingen van het afleiden van faalkansen op vakniveau en combineren van de vakkansen tot een totale faalkans op trajectniveau voor de gehele polder, waarbij is aangenomen dat elementen van 300 meter voor piping onafhankelijk zijn (KPR, 2017).

Strekking A

Voor strekking A is 1 doorsnede doorgerekend (KR103_0054), dus 1 element van 300 meter heeft een faalkans die significant is. De overige elementen hebben faalkans verwaarloosbaar. Het is dus niet nodig om de strekkingslengte te bepalen, omdat de strekkingskans bepaald wordt met;

- $P_{f_{\text{strekkingA}}} = 1 - (1 - P_{0054}) * (1 - P_{FV})^n \approx 1 - (1 - P_{0054}) = P_{0054} \approx \mathbf{1/10.700}$

Strekking B

Voor strekking B zijn twee doorsnedes doorgerekend. Deze liggen echter binnen 300 meter van elkaar, waardoor deze niet onafhankelijk van elkaar zijn. Bij volledige afhankelijkheid zal de maximale faalkans van de twee doorsnedes de faalkans van het element bepalen, wat neerkomt op 1/3.400 per jaar. De overige elementen hebben faalkans verwaarloosbaar. Het is dus niet nodig om de strekkingslengte te bepalen, omdat de strekkingskans bepaald wordt met;

- $P_{f_{\text{strekkingB}}} = 1 - (1 - \max(P_{0203}, P_{0205})) * (1 - P_{FV})^n \approx 1 - (1 - \max(P_{0203}, P_{0205})) = P_{0203} \approx \mathbf{1/3.400}$

Strekking C

Voor strekking C zijn twee doorsnedes doorgerekend. Deze liggen echter binnen 300 meter van elkaar, waardoor deze niet onafhankelijk van elkaar zijn. Bij volledige afhankelijkheid zal de maximale faalkans van de twee doorsnedes de faalkans van het element bepalen, wat neerkomt op 1/1,04E8 per jaar. Dit is een dusdanig kleine kans (in het kader van regionale keringen) dat dit ook als faalkans verwaarloosbaar (FV) kan beschouwd worden. Omdat alle overige elementen ook een verwaarloosbare faalkans hebben, is de faalkans van strekking C als verwaarloosbaar ingeschat.

Trajectkans

Met de faalkansen van alle strekkingen kan een trajectkans voor het faalmechanisme piping worden afgeleid. Gezien de strekkingen uit elkaar liggen en de ondergrond niet homogeen is, worden de vakken onafhankelijk gecombineerd (grotweg de som van de afzonderlijke kansen). Dit resulteert in een trajectkans:

- $P_{f_{\text{traject KR103}}} = 1 - (1 - 1/10.700) * (1 - 1/3.400) * (1 - FV) \approx \mathbf{1/2.600}$
- $P_{f_{\text{traject KR103}}} = 1/10.700 + 1/3.400 + FV \approx \mathbf{1/2.600}$

4.4 Beschouwing resultaten faalmechanismen

Uit paragraaf 4.1 (Hoogte), paragraaf 4.2 (Stabiliteit) en paragraaf 4.3 (Piping) zijn de faalkansen voor de kadering beschikbaar voor deze drie faalmechanismen. Ook zijn de gevoeligheden beschouwd welke impact hebben op de afleiding van een probabilistische faalkans van de verschillende doorsneden. De lengte-effecten van doorsneden naar strekkingen/vakken zijn voor de faalmechanismen toegepast. Voor hoogte is het lengte-effect klein maar voor de geotechnische mechanismen zeer relevant. Ook hier zijn de gevoeligheden van beschouwd. In deze paragraaf worden de resultaten van de faalmechanismen gecombineerd en de verschillende gevoeligheden met elkaar vergeleken. Tot slot wordt de impact op de trajectkans geïllustreerd aan de hand van fictieve maatregelen voor hoogte (overloop/overslag), macro-instabiliteit binnenwaarts en piping.

4.4.1 Gecombineerde trajectkans

Om tot een gecombineerde trajectkans te komen, moeten de faalkansen per faalmechanisme gecombineerd worden. Het uitgangspunt hierbij is dat sprake is falen indien minstens één van de faalmechanismen optreedt (seriesysteem). Vanuit de theorie zijn drie bekende hoekpunten beschikbaar:

1. Disjuncte gebeurtenissen: Als faalmechanisme A optreedt, kan faalmechanisme B niet optreden (en vice versa). Voor disjuncte gebeurtenissen is de trajectkans de som van P_a en P_b ;
2. Volledig onafhankelijke gebeurtenissen: Als faalmechanisme A optreedt, is een kleine kans aanwezig dat faalmechanisme B ook optreedt (en vice versa). Voor onafhankelijke gebeurtenissen is de trajectkans: $1 - (1-P_a)*(1-P_b)$;
3. Volledig afhankelijke gebeurtenissen: Als faalmechanisme A optreedt, dan zal faalmechanisme B ook optreden (en vice versa). Voor volledig afhankelijke gebeurtenissen is de trajectkans het maximum van P_a en P_b .

In de praktijk zal de systeemfaalkans voor disjuncte en volledig onafhankelijke gebeurtenissen nauwelijks verschillen. Het is daarom voor de praktijk niet zo relevant om te beredeneren of faalmechanismen disjunct of volledig onafhankelijk zijn. De waarheid zal in de praktijk vaak ergens tussen volledig onafhankelijk en volledig afhankelijk liggen. Zo kan de freatische lijn in de dijk worden gedomineerd door een storm die resulteert in significante golfoverslag maar faalt de kering ook op hoogte (erosie binnentalud) bij golfoverslag. Voor de drie beschouwde faalmechanismen zijn de trajectkans schattingen op basis van de drie hierboven beschouwde hoekpunten:

- Disjunct: $P_f = \text{som}(P_{f1}, P_{f2}, P_{f3}) \approx 1/160$
- Volledig onafhankelijk: $P_f = 1 - ((1-1/460)*(1-1/265)*(1-1/2.600)) \approx 1/160$
- Volledig afhankelijk: $P_f = \max(P_{f1}, P_{f2}, P_{f3}) \approx 1/265$

Hieruit volgt dat disjunct en volledig onafhankelijk een (nagenoeg) identieke trajectkans opleveren. Er is wel een verschil tussen volledig onafhankelijk en volledig afhankelijk. De exacte mate van afhankelijkheid die in de praktijk aanwezig is, is vaak lastig te bepalen. Omdat het verschil echter beperkt is, en om te benadrukken dat faalkansen schattingen zijn, wordt het bereik aangehouden als de schatting van de trajectkans; **1/160-1/265 per jaar**.

4.4.2 Impact op de trajectkans

In deze paragraaf is de impact op de overstromingskans van het traject vanuit verschillende versterkingsmaatregelen beschreven. Daarvoor zijn eerst de gevoeligheden van de

versterkingsmaatregelen op de doorsnedenkansen beschreven. In Tabel 4-7 is een overzicht gegeven van de resulterende trajectkansen door verschillende combinaties van maatregelen.

Hoogte

Uit de resultaten in paragraaf 4.1.3 blijkt dat strekking 5 (het niet-versterkte deel), langs het Fluessen meer, maatgevend is voor de trajectkans van hoogte. Er is een zware NW-storm nodig om tot falen te kunnen leiden. Een deel van deze strekking 5 is versterkt, waarbij de kering is opgehoogd, het binnentalud verflauwd naar een 1:7 talud, en breuksteen is aangebracht om golven te breken. De maatgevende locatie in het niet versterkte deel betreft KR103_0041. Paragraaf A.5.1 richt zich op het versterkte deel en paragraaf A.5.2 gaat in op het niet versterkte deel. De vakkans voor strekking 5 bedraagt (zie ook paragraaf 4.1.3):

- $P_{f_{\text{strekking5}}} = \text{MAX}(1/45.500, 1/920) = \mathbf{1/920}$

Er zijn meerdere versterkingsmaatregelen mogelijk. Zo kan de kruinhoogte van de dijk worden verhoogd om de frequentie van overloop/overslag te verkleinen, breuksteen op het buitentalud worden gelegd om de golven te breken en het binnentalud worden verflauwd om minder snel erosie op te laten treden.

Wanneer twee versterkingsaanpassingen van het versterkte deel ook worden toegepast op het niet-versterkte deel kan de schematisatie worden aangepast: de kruinhoogte is met 40 centimeter verhoogd, en de ruwheid van het buitentalud is verhoogd (breuksteen). De kans op falen door overslag/overloop reduceert. De faalkans van de maatgevende locatie bedraagt dan 1/1.680 per jaar. De vakkans voor strekking 5 is dan:

- $P_{f_{\text{strekking5}}} = \text{MAX}(1/45.500, 1/1.680) = \mathbf{1/1.680}$

Verder kan ook de het binnentalud worden verflauwd wanneer de kruin wordt verhoogd en breuksteen wordt aangelegd. Als het talud is verflauwd naar een 1:7 talud is de eerdere gehanteerde kansverdeling van het kritiek debiet waarschijnlijk veel te conservatief. Immers, een flauw talud faalt minder snel door erosie. Door de kansverdeling van het kritiek debiet aan te passen⁷ reduceert de kans op falen door overslag/overloop. De faalkans van de maatgevende locatie bedraagt dan 1/45.500 per jaar. De vakkans voor strekking 5 is dan:

- $P_{f_{\text{strekking5}}} = \text{MAX}(1/45.500, 1/45.500) = \mathbf{1/45.500}$

Stabiliteit

Uit de resultaten in paragraaf 4.2.3 blijkt dat strekking 3 van orde 1,6 kilometer in het noorden, langs het Fluessen meer, maatgevend is voor de trajectkans van macro-instabiliteit binnenwaarts. Een significant deel van deze strekking 3 (850 meter) is versterkt, waarbij de kruin is opgehoogd en het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 talud. De maatgevende locatie in het niet versterkte deel betreft KR103_0168. Paragraaf B.3.1 richt zich op het versterkte deel en paragraaf B.3.2 gaat in op het niet versterkte deel. De vakkans voor strekking 3 bedraagt (zie ook paragraaf 4.2.3):

- $P_{f_{\text{strekking3}}} = 1 - ((1 - 1/4.400)^{15} * (1 - FV)^{17}) \approx \mathbf{1/295}$

Er zijn meerdere versterkingsmaatregelen mogelijk. Zo kan het verkeer op de dijk gelimiteerd worden om de kans op een relatief hoge verkeersbelasting te reduceren, de kruinhoogte van de dijk worden verhoogd om de frequentie van infiltratie van water door overloop/overslag te verkleinen en een stabiliteitsberm aanleggen om de kans op een afschuiving te reduceren.

⁷ De kansverdeling uit WBI2017 voor een gesloten zode bij de kleinste golfklasse wordt gehanteerd; dit is de gunstigste kansverdeling.

Op het niet versterkte deel van strekking 3 is een lokale weg aanwezig. Voor de dagelijkse kans op het voorkomen van een zware verkeerslast van 5kPa is hier 12/365 (maandelijks) aangenomen. Wanneer verkeersmaatregelen worden genomen om deze zware verkeerslast minder frequent te laten voorkomen (eens per jaar), is de dagelijkse kans op een zware verkeerslast daarmee 1/365. De kans op falen door macro-instabiliteit binnenwaarts reduceert hierdoor. De faalkans van de maatgevende locatie bedraagt dan 1/19.000 per jaar. De vakkans voor strekking 3 is dan:

- $Pf_{\text{strekking3}} = 1 - ((1 - 1/19.000)^{15} * (1 - FV)^{17}) \approx \mathbf{1/1.270}$

Verder kan ook het niet versterkte deel van strekking 3 worden versterkt met een stabiliteitsberm. In deze voorbeelduitwerking is een bermbreedte van 1 en 2 meter toegepast. Daartoe is de teensloot aan binnendijkse zijde met 1 of 2 meter verplaatst waardoor er een berm van 1 of 2 meter op een niveau van NAP -0,5m ontstaat. Een volledig verzadigde dijk (FL4), waarbij de freatische lijn op 10cm het dijkprofiel volgt, is maatgevend voor deze locatie. Daarom zijn de 'versterkte' scenario's (1 of 2 meter berm) enkel doorgerekend bij een volledig verzadigde dijk (FL4) en alle bijbehorende verkeersbelastingsscenario's. Deze punten zijn aangepast in de 3D Fragility Curve waardoor de kans op falen door macro-instabiliteit binnenwaarts reduceert. De faalkans van de maatgevende locatie bedraagt dan 1/17.700 per jaar (1m berm) of 1/78.000 per jaar (2m berm). De vakkans voor strekking 3 is dan bij een berm van 2 meter:

- $Pf_{\text{strekking3}} = 1 - ((1 - 1/78.000)^{15} * (1 - FV)^{17}) \approx \mathbf{1/5.200}$

Piping

Er is langs de kadering slechts een beperkt verschil tussen dagelijkse waterstanden en toetspeil. Hoogwaters zijn het gevolg van opstuwing door storm. Ze zijn daarom van relatief korte duur. Ook is er geen sprake van een sterke stroming (meer) zodat het aannemelijk is dat er sprake is van aanzienlijke intredeweerstand door neergeslagen slib, zie ook paragraaf 4.3.2. Uit de Resultaten Piping blijkt dan ook dat de kans op falen door piping klein is ten opzichte van hoogte en stabiliteit. Daarom zijn er geen versterkingsmaatregelen geïnventariseerd.

Trajectkans

Omdat disjunct en volledig onafhankelijk een (nagenoeg) identieke trajectkans opleveren is er in onderstaande tabel gesommeerd om de trajectkans na versterkingsmaatregelen te berekenen. Er is nog wel een verschil tussen volledig onafhankelijk en volledig afhankelijk maar het is niet realistisch dat de verschillende faalmechanismen volledig afhankelijk zijn.

Tabel 4-7 Impact van de versterkingsmaatregelen op de overstromingskans van het traject

Trajectkans	Geen stabiliteitsberm	Stabiliteitsberm 1 m	Stabiliteitsberm 2 m
Geen kruinverhoging	1/160	1/265	1/315
Kruinverhoging 40 cm	1/170	1/300	1/370
+ Verflauwing talud 1:7	1/190	1/370	1/470

Uit bovenstaande Tabel 4-7 Impact van de versterkingsmaatregelen op de overstromingskans van het traject blijkt dat het versterken van strekking 3 met een stabiliteitsberm duidelijk meer impact heeft op de trajectkans dan het versterken van strekking 5 met het verhogen van de kruin (+ verflauwen van het talud). Het verschil tussen geen (1/160) en alle beschreven versterkingsmaatregelen (1/470) is een factor drie. Ofwel, één normklasse (IPO-III – IV)⁸.

⁸ Of een directe, getalsmatige vergelijking van overstromingskansen met IPO-normen toepasbaar is, is een openstaande vraag. Om de impact op de trajectkans te duiden is hier de aanname gedaan dat de getalswaarde van de IPO-overschrijdingskansnorm kan worden gespiegeld aan een berekende overstromingskans. In paragraaf 5.2 wordt hier verder op ingegaan.

5 Conclusies

In deze rapportage is een voorbeelduitwerking gegeven van een overstromingskansbenadering voor een regionale kering. Voor de voorbeelduitwerking is gebruik gemaakt van de casus 'Boezemkade – landelijk gebied', in het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Dit betreft een van de eerdere pilots van de verkenning naar verbeteringen van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen. De opgedane inzichten in deze eerdere pilots dienen de toekomstige besluitvorming over de verbetering van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen. In deze studie is gebruik gemaakt van de in de pilots opgedane leerervaringen. Centraal staat de werkwijze om te komen tot een overstromingskans voor een polder. De voornaamste doelen van de voorbeelduitwerking zijn:

1. Illustreren hoe op pragmatische wijze een plausibele overstromingskans voor een polder (beschermd door regionale keringen) kan worden bepaald, en welke inspanning hiermee gemoeid is;
2. Beschouwen hoe de resultaten van een beoordeling op basis van een overstromingskansbenadering zich verhouden tot de huidige overschrijdingskansbenadering.

Waarbij doelstelling 1 verder is onderverdeeld in de volgende onderdelen:

- a. Illustreren hoe berekeningen uit eerdere toetsingen (conform de huidige overschrijdingskansbenadering) kunnen worden hergebruikt in de overstromingskansbenadering.
- b. Het bepalen van een realistische faalkans op doorsnedeniveau per faalmechanisme (voor hoogte, binnenwaartse stabiliteit en piping). Hier wordt geïllustreerd hoe rekenen met een overstromingskansbenadering en bijbehorende rekentechnieken kan leiden tot een realistische(re) faalkans op doorsnedeniveau;
- c. Het vertalen van de faalkansen per doorsnede per faalmechanisme naar een totale overstromingskans voor de polder (assemblage), rekening houdend met onderlinge correlaties en lengte-effect met een pragmatische, doch realistische werkwijze;

De doelstellingen zijn gericht op het pragmatisch afleiden van een plausibele overstromingskans. Er is geen nadere analyse gedaan naar de implementatie (on)mogelijkheden voor meerdere beheerdersgebieden. In paragraaf 5.1 en 5.2 wordt teruggekeken op deze doelstellingen.

5.1 Doelstelling 1: overstromingskansbenadering

In deze voorbeelduitwerking is het gelukt om op een pragmatische wijze een realistische overstromingskans van een regionale kering te bepalen. De werkwijze vormt een illustratie voor de uitwerking van de overstromingskansbenadering voor regionale keringen. Dit wordt toegelicht aan de hand van de drie eerder genoemde onderdelen van doelstelling 1 welke betrekking hebben op de casus "Boezemkade – landelijk gebied". Tot slot zijn in paragraaf 5.1.1 alle belangrijke aannames in deze werkwijze gerapporteerd, voor de navolgbaarheid maar ook als een aanbeveling voor vervolgonderzoek.

Het illustreren van het hergebruik van berekeningen uit eerdere toetsingen

Voor de kadering is in 2014 (en 2022) een hoogtetoets en in 2016 (en 2022) een stabiliteitstoets uitgevoerd. De resultaten van deze toetsingen zijn gehanteerd om een filtering toe te passen. Voor hoogte zijn alleen de locaties met een terugkeertijd kleiner dan 1000 jaar (dus een overschrijdingsfrequentie groter dan eens per 1000 jaar) beschouwd. Op basis hiervan (zie Figuur 4-1 en Figuur 4-2) zijn er zeven strekkingen nader beschouwd in de voorbeelduitwerking. Alle overige strekkingen zijn als evident veilig bestempeld (geen significante bijdrage aan de overstromingskans). Ervaringen van de beheerder zijn benut om evident veilige (én potentiële maatgevende) strekkingen te identificeren. Voor stabiliteit zijn alleen de locaties met een stabiliteitsfactor kleiner dan 1 beschouwd⁹. Op basis hiervan (Figuur 4-4) zijn zes bepalende strekkingen beoordeeld in de voorbeelduitwerking. Alle overige strekkingen zijn als evident veilig bestempeld. Tot slot zijn voor piping de locaties met een veiligheidsfactor kleiner dan 1,2 beschouwd¹⁰. Op basis hiervan (Figuur 4-6 en Figuur 4-7) zijn drie maatgevende strekkingen nader beschouwd. Streckingen met een veiligheidsfactor groter dan 1,2 zijn als evident veilig beschouwd.

Voor alle drie de faalmechanismes (hoogte, stabiliteit en piping) zijn de bestaande toetsingsberekeningen succesvol gebruikt om een beperkt aantal maatgevende strekkingen nader te beschouwen. Door het toepassen van deze filtering hoefden slechts 16 probabilistische sommen gemaakt te worden om de overstromingskans van de kadering te benaderen. Dit is in de volgende paragraaf nader toegelicht.

Het bepalen van een realistische faalkans op doorsnedeniveau per faalmechanisme

De maatgevende locaties voor hoogte zijn opnieuw doorgerekend in PROMOTOR. In de uitwerking is ditmaal niet gerekend met een vast kritiek overslagdebiet. In plaats daarvan is voor een range aan overslagdebieten met PROMOTOR de (jaarlijkse) overschrijdingskans bepaald. Door vermenigvuldiging (en uitintegratie) met een kansverdeling van het kritiek overslagdebiet (m.a.w. de kans dat een bepaald overslagdebiet tot falen leidt) resulteert een realistische faalkans per jaar. Indien door PROMOTOR onrealistisch hoge overschrijdingskansen (eens per 10 jaar) worden berekend bij lage overslagdebieten (t/m 5 l/s/m) kan op basis van de kennis van de beheerder de kansverdeling van het kritiek overslagdebiet worden aangepast. Zo kan ervoor worden gezorgd dat de overschrijdingskansen passen bij de kennis en ervaring van de beheerder. Overigens is het nog steeds mogelijk om met deze werkwijze te rekenen met een vast kritiek overslagdebiet. Los van wijzigingen in de profielschematisatie is dit in feite de toepassing met Promotor zoals deze ook in eerdere toetsingen is uitgevoerd.

Voor de maatgevende locaties voor stabiliteit zijn probabilistisch stabiliteitsberekeningen gemaakt met D-Stability. De berekeningen zijn gemaakt aan de hand van 3D-fragility curves¹¹. Verondersteld is dat de freatische lijn (door buitenwaterstand of neerslag) en de verkeerslast de twee drijvende belastingen zijn voor binnenwaartse instabiliteit. Voor in totaal negen combinaties van freatische lijn en verkeerslast zijn de conditionele kansen op afschuivingen bepaald. Door vermenigvuldiging (en uitintegratie) met de kansverdelingen van de belastingen resulteert een realistische kans per jaar. Indien hoge conditionele kansen resulteren zijn door middel van een faalpad de kansen op vervolgprocessen afgeleid (voor 3 vakken). Er vindt immers na een initiële afschuiving nog niet altijd direct een overstroming plaats. Dit is vooral kansrijk bij de locaties waar

⁹ In de toetsresultaten zijn berekende veiligheidsfactoren getoetst aan een schadefactor van 0,9. In het kader van deze studie zijn daarom toetsresultaten met veiligheidsfactoren > 1,0 als veilig beschouwd.

¹⁰ In de toetsresultaten zijn berekende veiligheidsfactoren getoetst aan een schadefactor 1,2. In het kader van deze studie zijn daarom toetsresultaten met veiligheidsfactoren > 1,2 als veilig beschouwd.

¹¹ Een 3D-fragility curve geeft de conditionele faalkans gegeven een combinatie van twee variabele belastingen.

de freatische lijn wordt bepaald door een extreme neerslaggebeurtenis. Vervolgprocessen vinden dan alleen plaats conditioneel op overslag van water over de (verlaagde) kruin van het restprofiel. Wanneer de freatische lijn wordt bepaald door overslag zijn de vervolgprocessen en de initiële afschuiving afhankelijk waardoor bovenstaande aanpak geen grote invloed heeft op de faalkans (bezwijken en falen zitten dan dicht bij elkaar). Er is met deze werkwijze natuurlijk nog steeds de mogelijkheid om de stabiliteit voor een enkele belastingcombinatie (van freatische lijn en verkeerslast) uit te rekenen, en ook om voor deze belastingcombinatie meerdere ondergrondscenario's te hanteren. Deze methode leidt ook tot een faalkans van de getoetste doorsnede.¹²

De maatgevende locaties voor piping zijn probabilistisch berekend met een probabilistische piping module (Python script). Uit eerdere toetsingen en ervaringen met de toepassing van de piping regels (heave, uplift en terugschrijdende erosie) voor regionale keringen blijkt dat een te sterk vereenvoudigde schematisatie tot onrealistisch hoge faalkansen kan leiden. Een voorbeeld is de kwelweglengte bepalen zonder de weerstand van het voorland en/of boezem in rekening te brengen. Conditioneel op de waterstand worden kansen op de deelmechanismen heave, uplift en terugschrijdende erosie bepaald. Dit resulteert in (2D) fragility curves. Door vermenigvuldiging (en uitintegratie) met behulp van een overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand (bepaald met PROMOTOR) resulteert een realistische faalkans. Indien bij lage waterstanden (tot eens per 10 jaar) hoge kansen op piping resulteren kan op basis van de kennis van de beheerder de schematisering (bijv. van de intredeweerstand) worden aangepast. Op deze wijze kan de kennis en ervaring van de beheerder in de analyse worden ingebracht. Er is natuurlijk nog steeds de mogelijkheid om de kans op piping (voor één waterstand) te berekenen, en ook om voor deze stationaire berekening meerdere ondergrondscenario's te hanteren. Deze methode leidt ook tot een faalkans van de getoetste doorsnede. Als in plaats van probabilistisch nu semi-probabilistisch wordt gerekend (met karakteristieke waarden), is dit in feite de toepassing van de piping regels (Sellmeijer) zoals deze ook in eerdere toetsingen zijn uitgevoerd.

Door het toepassen van deze rekentechnieken in combinatie met het toepassen van de kennis en ervaring van de beheerder én de schematiseringen aan te scherpen door het systeem te beschouwen zijn er realistische faalkansen afgeleid voor de 16 locaties van de kadering. Deze faalkansen zijn per doorsnede benaderd en moeten vertaald worden naar een totale overstromingskans voor de polder. Dit is in de volgende paragraaf nader toegelicht.

Het vertalen van de doorsnedefaalkansen naar een totale overstromingskans

Voor hoogte is er een hoge mate van correlatie tussen doorsneden in vergelijking tot geotechnische mechanismen. Dit komt doordat het falen op hoogte door de belasting (storm) wordt gedomineerd en het falen op geotechniek ook door de (heterogene) ondergrond wordt beïnvloed. Voor hoogte is de doorsnede kans gelijk genomen aan de vakkans. Voor het combineren van de faalkansen per vak naar traject is gekeken naar de verschillende belastingsituaties die een rol spelen langs de kering. Er zijn voor de zeven strekkingen vier belastingsituaties; NW storm, ZZW storm, overloop van boezem- en meer, en overloop van de (fictieve) rivier. Het falen van de strekkingen binnen de verschillende belastingsituaties worden afhankelijk aangenomen. De belastingsituaties worden vervolgens onafhankelijk gecombineerd.

¹² Het is uiteraard ook mogelijk om met een enkele verkeersbelasting te rekenen. Hierdoor reduceert de 3D fragility curve naar een 2D fragility curve (zie Tabel 4-4). Als ook met een enkele freatische lijn wordt gerekend, reduceert de 2D fragility curve naar een enkele stabiliteitsberekening (zie Bijlage B).

Bij macro-instabiliteit binnenwaarts en piping is er sprake van lengte-effect, omdat er een lage mate van correlatie tussen de doorneden is waardoor de faalkans voor een strekking groter wordt dan de faalkans van de maatgevende doorsnede (met toenemende lengte). De exacte mate van afhankelijkheid die in de praktijk aanwezig is, is vaak lastig te bepalen. Er is verondersteld dat elk homogeen element van 50 meter in een strekking onafhankelijk kan falen op macro-instabiliteit binnenwaarts en elk homogeen element van 300 meter kan falen op piping. Deze waarden volgen uit de literatuur maar vergen verdere onderbouwing. Paragraaf 4.2.3 en 4.3.3 laten de verhoging van de faalkans per doorsnede naar vak zien, welke voor macro-instabiliteit significant is. De maatgevende doorsnede wordt namelijk aan elk element toegekend binnen de strekking die gevoelig is voor het geotechnische faalmechanisme (op basis van stabiliteits- en veiligheidsfactoren uit voorgaande toetsingen). Bij het combineren van de faalkansen per vak naar traject wordt aangenomen dat de vakken onafhankelijk zijn. Dit komt doordat het falen op geotechniek ook door de (heterogene) ondergrond wordt beïnvloed.

Tot slot resteert het combineren van de faalkansen van faalmechanismen naar het traject. De verschillende faalmechanismen kunnen los van elkaar optreden. Echter, er bestaat wel degelijk enige afhankelijkheid tussen de verschillende faalmechanismen omdat in veel situaties er een verhoogde waterstand (of waterdruk/-spanning) benodigd is voor het falen van de kering. Vanuit de theorie volgt dat de correlatie tussen mechanismen zeer groot moet zijn voordat er een wezenlijk effect op de gecombineerde faalkans is te verwachten (zie ook de vele praktijkvoorbeelden uit VNK2). Daarom zijn de drie faalmechanismen onafhankelijk gecombineerd. Dit betekent dat de faalkansen per faalmechanisme grofweg zijn gesommeerd. Hiermee zijn op een uitlegbare wijze de doorsnedefaalkansen gecombineerd tot een totale overstromingskans.

5.1.1 Belangrijke aannames in de toegepaste werkwijze

In de toegepaste werkwijze om tot een overstromingskans voor de kadering te komen zijn (pragmatische) keuzes en aannames gedaan. In onderstaande opsomming zijn de belangrijkste aannames gerapporteerd waar onderscheid is gemaakt tussen de faalmechanismen en het assembleren (combineren) van faalkansen en -mechanismen.

Faalmechanisme Hoogte

- In de voorbeelduitwerking is gewerkt met een verdeling van het kritiek overslagdebiet. Door een gebrek aan kentallen voor de verdeling van het kritieke overslagdebiet voor regionale keringen, is deze verdeling is geschat op basis van primaire keringen (uit WBI2017).

Faalmechanisme Stabiliteit

- In de voorbeelduitwerking is niet gewerkt met meerdere ondergrondscenario's, maar is de lokaal aanwezige grondopbouw geschematiseerd. Indien er lokale informatie ontbreekt, is een aanname gedaan voor de aanwezige grondopbouw.
- De sterkteparameters cohesie en wrijvingshoek zijn ingevoerd als stochasten, op basis van een lognormale verdeling. De volumieke gewichten zijn ingevoerd als deterministische waarden (aangezien deze zowel positief als negatief bijdragen aan de stabiliteit).
- De gekozen scenario's (of belastingcombinaties) op basis van expert judgement bepalen de discretisatie van de 3D-fragility curves. Op basis van de ervaringen in dit rapport lijkt een verstandige werkwijze om de freatische lijn en verkeerslast als belangrijke belastingen te zien en dus in verschillende scenario's te discretiseren. Afhankelijk van het te beschouwen gebied kunnen dit ook andere belastingen zijn, dit is aan de beoordelaar om te beschouwen. Voor deze belastingen zijn verschillende discretisaties mogelijk: in dit rapport is gekozen om zowel de

freatische lijn alsook de verkeerslast in drie scenario's uit te werken (in totaal dus 9 belastingcombinaties).

- Er is aangenomen dat de stijghoogte niet wordt beïnvloed door het boezem- of meerpeil, en is daarom als determinist gekozen in de berekening van de faalkans.
- De relatie tussen de ligging van de freatische lijn en de hoeveelheid overslag of neerslag is op basis van expert judgement ingeschat. De 'reactie' van de freatische lijn op infiltratie is onbekend. Ook de verkeersbelastingen zijn ingeschat op basis van expert judgement.
- In de uitwerking is het Mohr Coulomb model gebruikt voor de stabiliteitsberekeningen conform de huidige vigerende werkwijze voor regionale keringen. Toepassing van het CSSM model kan invloed hebben op de berekende overstromingskans.

Faalmechanisme Piping

- De intredeweerstand is op basis van expert judgement ingeschat.
- Een aantal algemene piping stochasten zijn geschat op basis van primaire keringen (WBI 2017)
- De eigenschappen van de deklaag en watervoerende laag zijn ingeschat op basis van de lokaal beschikbare gegevens in REGIS II en GEOTop, waarbij de onzekerheid in deze schattingen zijn gebaseerd op de door REGIS II en GEOTop aangegeven spreidingen.

Assembleren (combineren)

- Er is verondersteld dat elk homogeen element van 50 meter in een vak onafhankelijk kan falen op macro-instabiliteit binnenwaarts en elk homogeen element van 300 meter kan falen op piping. Deze waarden volgen uit de literatuur maar zijn beperkt onderbouwd.
- Bij het combineren van de vakkansen voor hoogte is gekeken naar verschillende belastingsituaties die langs de kering een rol spelen. Bij het combineren van de vakkansen voor geotechnische mechanismen is aangenomen dat de vakken onafhankelijk zijn. De ervaring uit bijvoorbeeld VNK2 leert dat deze benaderingen vrij nauwkeurig zijn. Voor toepassing bij regionale keringen is verificatie hiervan wel aan te bevelen, met aandacht voor het verschil tussen boezem- en kanaalkaden enerzijds, en keringen langs regionale rivieren anderzijds.
- Om tot een gecombineerde trajectkans te komen, moeten de faalkansen per faalmechanisme gecombineerd worden. De waarheid zal in de praktijk vaak ergens tussen volledig onafhankelijk en volledig afhankelijk liggen. De exacte mate van afhankelijkheid die in de praktijk aanwezig is, is vaak lastig te bepalen.

5.2 Doelstelling 2: overstromings- versus overschrijdingskans

De berekende overstromingskans kan (nog) niet direct vergeleken worden met een vigerende overstromingskansnorm omdat deze nog niet bestaat. Wel kan een vergelijking worden gemaakt met de huidige overschrijdingskansnorm (IPO-klasse) om een eerste indicatie te geven.

In de IPO-richtlijn ter bepaling van de veiligheidsniveau van boezemkaden (IPO, 1999), met daarin de herziene genormeerde gevolgschade (STOWA, 2022) laten zien dat de huidige IPO-klassen hun oorsprong vinden in een overstromingsrisico-gedacht. De klassen zijn namelijk gerelateerd aan de inundatiediepte, gewogen polderoppervlak en de resulterende genormeerde gevolgschade. Dit blijft dan ook de basis voor de verbeterde veiligheidsbenadering.

En zoals nu al het geval is, is een overstromingsrisico-norm te vertalen naar een eis op overstromings- en overschrijdingskans en vice versa. Hierdoor kan een eventuele toetsing in de toekomst met een resulterende overstromingskans nog steeds gerelateerd worden aan een overschrijdingskansniveau, zoals we nu gewend zijn.

Om een eerste indicatie te geven is in deze voorbeelduitwerking de berekende overstromingskans gespiegeld aan het IPO-klasse III overschrijdingskansniveau van de kadering. De regionale waterkering heeft een veiligheidsnorm van 1/100 per jaar (overschrijdingskansnorm). De berekende overstromingskans van het pilotgebied ligt tussen de 1/160-1/265 per jaar. Deze kans is getalsmatig kleiner dan de geldende veiligheidsnorm. Dit resultaat is plausibel aangezien de maatgevende (of kritische) dijkvakken in de kadering recent zijn versterkt. Het ligt dus niet in de lijn der verwachting (aan de hand van deze casus) dat met deze methode andere dimensies voor regionale keringen vereist of ontworpen zullen worden. Versterkte keringen hebben geen significante bijdrage aan de overstromingskans. De methode geeft wel de mogelijkheid om scherper te toetsen.

Bij dit plausible resultaat dient te worden vermeld dat of een directe, getalsmatige vergelijking van overstromingskansen met IPO-normen toepasbaar is, een openstaande vraag is. In het verleden zijn foutenbomen opgesteld die suggereren dat er een factor 5 tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans zitten. Deze factor 5 is echter nooit expliciet toegepast bij het afleiden van ontwerp- en toetsregels. Ook is het onduidelijk of deze factor 5 betrekking heeft op de overstromingskans van een doorsnede/vak, of op de overstromingskans van een heel traject. Bij een factor 5 verschil op doorsnedeniveau, kan het verschil op trajectniveau veel kleiner zijn dan een factor 5 (mogelijk zelfs kleiner dan 1). Omdat deze discussie nog niet is beslecht is een directe, getalsmatige vergelijking van overstromingskans met IPO-norm toegepast.

6 Discussie

In deze voorbeelduitwerking zijn aannames gedaan in de berekening van de overstromingskans. Een uitgebreide opsomming van aannames zijn opgenomen in paragraaf 5.1.1. Er zijn dan ook besluiten nodig over (de uitgangspunten van) methodes, om deze methodes toe te passen in de toetsing van regionale keringen. Zo is bijvoorbeeld voor hoogte de vaststelling van de kansverdeling van het kritieke overslagdebiet zeer relevant in de verdere implementatie. Ook voor stabiliteit zijn de gekozen scenario's (/belastinggevallen) gekozen op basis van expert judgement en verdient de relatie tussen de freatische lijn en overslag of neerslag nadere uitwerking. Verder zijn de verschillende verkeersbelastingen ingeschat op basis van expert judgement en kan een verdere classificatie van een kansverdeling tot een robuuste methode leiden.

Er is in de voorbeelduitwerking gekozen om expliciet te kijken naar een aantal locaties die, op basis van eerdere toetsingen, de overstromingskans bepalen. Dit zorgt er voor dat de inspanning bij een beoordeling gaat zitten in een plausibele kansbepaling van de kritieke doorsneden. Er zijn dan geen bulk berekeningen nodig voor de hele kadering op basis van verschillende (ondergrond) scenario's. Opgemerkt wordt dat wanneer er geen (dekkende) toetsresultaten uit eerdere beoordelingen zijn, er wel eerst op hoger abstractieniveau inzichten nodig zijn voor het signaleren van de kritieke doorsneden. Dit kan bijvoorbeeld op basis van de ervaring van de beheerder. Er is nog geen nadere analyse gedaan naar de implementatie (on)mogelijkheden van deze werkwijze voor meerdere beheerdersgebieden of indien meer automatisering dient te worden toegepast.

Ook de rekenmethoden voor de faalmechanismen zijn gekozen voor deze voorbeelduitwerking. Zo is PROMOTOR gebruikt voor de hoogte, D-Stability voor stabiliteit en een Python-tool voor piping. In de uitwerking is het Mohr Coulomb model gebruikt voor de stabiliteitsberekeningen conform de huidige vigerende werkwijze, maar een discussie is nodig of de regionale keringen getoetst worden met het (gedraineerde) Mohr Coulomb model of met het (ongedraineerde) Critical State Soil Mechanics (CSSM) model. Ook het uitintegreren van de 3D-fragility curves (conditionele faalkans gegeven een combinatie van verkeersbelastingen en freatische lijnen) kan worden ontsloten in een Python-tool of Excel-sheet. Verder zijn probabilistische pipingberekeningen uitgevoerd terwijl ook semi-probabilistische sommen wellicht kunnen volstaan (of geen sommen, als piping op grond van de lokale ondergrond- en/of belastingcondities vrijwel uitgesloten is). Dit kan op basis van meerdere uitwerkingen worden aangetoond, maar een uitgangspunt voor het schematiseren van de intredeweerstand is zeer relevant.

Voor consistentie moeten de methodes worden geïntroduceerd bij de gebruikers waarin belangrijke aandachtspunten en gevoeligheden worden toegelicht. Dit zorgt er voor dat de aanpak zoals in de voorbeelduitwerking goed werkbaar is maar ook dat toekomstige toetsingen consistent en reproduceerbaar zijn. Een voorbeeld is hoe met het lengte-effect dient te worden omgegaan. Voor hoogte is er een hoge mate van correlatie tussen doorsneden in vergelijking tot geotechnische mechanismen. De faalkans van een strekking wordt dan (met toenemende lengte) groter dan de faalkans van de maatgevende doorsnede. In de voorbeelduitwerking zijn elementen aangenomen die onafhankelijk kunnen falen maar dit kan natuurlijk per strekking verschillen. Het is raadzaam het leergeld uit primaire keringen te benutten en pragmatische handvatten te ontwikkelen. Enkele voorbeelden zijn gegeven in deze voorbeelduitwerking.

7 Referenties

Bosma N., 2014.

Rapportage Hoogtetoets Regionale Waterkeringen Wetterskip Fryslân, 2014.

Bosma N., 2016.

Rapportage Stabiliteitstoets Regionale Waterkeringen Wetterskip Fryslân, 2016.

ENW, 2009.

Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken, 2009.

IPO, 1999.

IPO-richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden, Interprovinciaal Overleg, 1999.

Kuijper B., 2021.

PROMOTOR gebruikershandleiding versie 4.3. PR4347.20, november 2021.

KPR, 2017.

Factsheet KPR vakgrootte, versie 2, Nieuwegein, 2017.

LTV, 2007.

Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), 2007.

LTV, 2011.

Addendum op de leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), 2011.

Nationaal Landschap Zuidwest Fryslân, 2021.

Het verhaal van nationaal landschap Zuidwest Fryslân, Oudermirdum, 2021, URL: <https://nationaallandschap.frl/nationaal-landschap-zuidwest-Fryslân/>.

Rinsum van G.P., 2022.

Onderzoek normering regionale kering. Witteveen&Bos. In opdracht van STOWA. 128187/22-005.153, 6 april 2022.

STOWA, 2009.

Onderzoek naar de schematisering van verkeersbelasting op kades, rapportnummer 2009-16 ORK, Utrecht, 2009.

STOWA, 2022.

Actualisering IPO-schadetabel regionale keringen, Stowa, 2022.

WBI 2017a, 2019.

Schematiseringshandleiding piping.

WBI 2017b, 2019.

Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk.

WBI 2017c, 2019.

Schematiseringshandleiding grasbekleding.

Wetterskip Fryslân, 2021.

Ontwerp revisiepeilbesluit Friese Boezem (toelichting), Leeuwarden, 2021.

WTI 2017, 2016.

Derivation of the semiprobabilistic safety assessment for piping.

RWS WVL, 2017.

Handreiking ontwerpen met overstromingskansen - Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen-normen, OI2014v4, februari 2017, definitief.

Bijlagen

A Hoogte

Voor de bepaling van de faalkans van de dijk door overloop of overslag van water (ook wel 'hoogte') zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Elk van de in paragraaf 4.1.1 beschreven strekkingen is beschouwd. Voor elke strekking is de maatgevende doorsnede opnieuw doorgerekend in PROMOTOR.
- Voor elke strekking is geverifieerd of de schematisering uit de toetsing van 2022 (dan wel 2015) nog geldig is. Zo niet, is deze aangepast.
- In plaats van rekenen met een vast kritiek overslagdebiet, is voor een range aan overslagdebieten met PROMOTOR de (jaarlijkse) overschrijdingskans bepaald (per doorsnede/locatie). Dit leidt tot een kansverdeling van het overslagdebiet per berekende doorsnede.
- Bovenstaande kansverdeling is gecombineerd met een kansverdeling van het kritiek overslagdebiet (m.a.w. de kans dat een bepaald overslagdebiet tot falen leidt, Tabel 4-1). Vermenigvuldigen en uitintegreren van beide verdelingen leidt tot de faalkans per jaar.

A.1 Strekking 1

A.1.1 Analyse

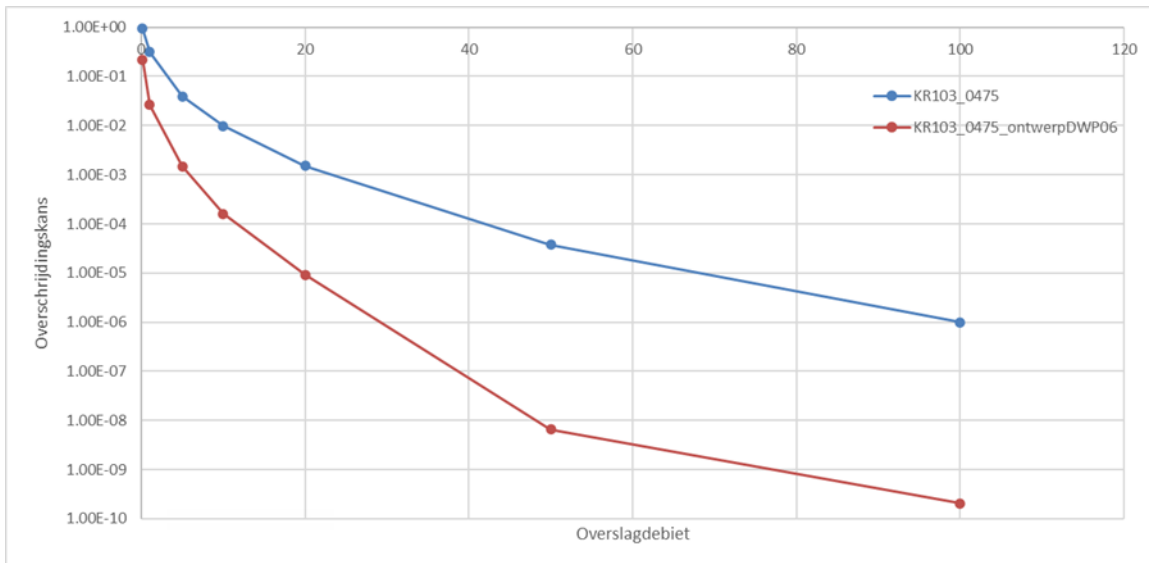
Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 1. De maatgevende locatie van strekking 1 uit de toetsing van 2022 betreft KR103_0475. Uit gesprekken met de beheerder bleek dat de kering ter plaatse van strekking 1 is opgehoogd, het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 talud, en breuksteen is aangebracht om golven te breken. Deze aanpassingen waren in de toetsing van 2022 nog niet doorgevoerd. De schematisatie van 2022 is daarom aangepast: de kruinhoogte is aangepast naar de afkeurhoogte uit het ontwerp, en de ruwheid van het buitentalud is verhoogd (breuksteen).



Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR in rood (de blauwe lijn toont ter illustratie de kansverdeling wanneer de ruwheid van het talud niet wordt aangepast). Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/5.100.

Omdat het talud is verflauwd naar een 1:7 talud is de gehanteerde kansverdeling van het kritiek debiet waarschijnlijk veel te conservatief. Immers, een flauw talud faalt minder snel door erosie. Daarom is ervoor gekozen de kansverdeling van het kritiek debiet aan te passen, en de

kansverdeling uit WBI2017 voor een gesloten zode bij de kleinste golfklasse te hanteren; dit is de gunstigste kansverdeling ('G 0 tot 1' in *Figuur 4-3*). Dit resulteert in een faalkans op hoogte van 1/298.000. Dit is de uiteindelijke faalkans voor deze strekking.



A.1.2 Duiding

Uit de analyse resulteert een faalkans op doorsnedeniveau van 1/298.000. Kijkend naar de berekende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, valt op dat een overslagdebiet van 1l/s/m slechts eens per 40 jaar voorkomt; hogere overslagdebieten nog veel minder vaak (5l/s/m slechts eens per 700 jaar, 10l/s/m slechts eens per 6.500 jaar, enz.). Dit komt overeen met het beeld dat de beheerder heeft van de kering; deze geeft aan dat er eigenlijk nooit sprake is van overslag, alleen bij stevige storm van wat spatwater.

De grootste faalkansbijdrage voor deze locatie ligt in de overslagdebieten tussen 1 en 20l/s/m. De illustratiepunten bij deze debieten zijn opgenomen in onderstaande tabel. Ter referentie bij de waterstanden: de kruinhoogte ligt op 0,70m+NAP.

Illustratiepunt Overslagdebiet	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte H _s [m]	Windrichting	Windsnelheid [km/u]
1 l/s/m	-0,35	0,67	WNW	89,3
20 l/s/m	-0,12	0,93	WNW	130,8

Uit bovenstaande blijkt dat de overslagdebieten voornamelijk worden veroorzaakt door storm (WNW-richting). Voor een overslagdebiet van 20l/s/m is zeer zware storm (orkaankracht) nodig. Dit past bij de zeer lage kans die wordt berekend. De kans op overloop voor de berekende doorsnede bedraagt ca. 1/50.000.000. Dit onderschrijft dat overslag voornamelijk wordt veroorzaakt door storm, en niet door de waterstand. Dit volgt ook uit de kansverdeling van het overslagdebiet, die vrij steil verloopt, hetgeen aangeeft dat overslag maatgevend is boven overloop (indien overloop maatgevend wordt, zal de curve vanaf een bepaald debiet een vlak verloop kennen).

A.2 Strekking 2

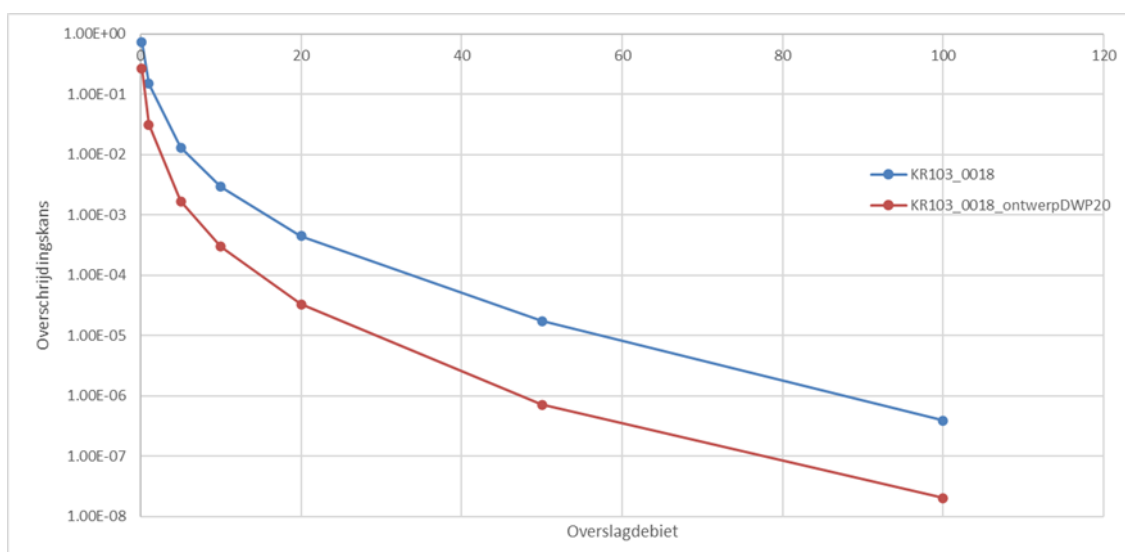
A.2.1 Analyse

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 2. De maatgevende locatie van strekking 2 uit de toetsing van 2022 betreft KR103_0018. Uit gesprekken met de beheerder bleek dat de kering ter plaatse van strekking 2 is opgehoogd, het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 talud, en breuksteen is aangebracht om golven te breken. Deze aanpassingen waren in de toetsing van 2022 nog niet doorgevoerd. De schematisatie van 2022 is daarom aangepast: de kruinhoogte is aangepast en de ruwheid van het buitentalud is verhoogd (breuksteen).



Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR in rood (de blauwe lijn toont ter illustratie de kansverdeling wanneer de ruwheid van het talud niet wordt aangepast). Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/4.000.

Omdat het talud is verflauwd naar een 1:7 talud is de gehanteerde kansverdeling van het kritiek debiet waarschijnlijk veel te conservatief. Immers, een flauw talud faalt minder snel door erosie. Daarom is ervoor gekozen de kansverdeling van het kritiek debiet aan te passen, en de kansverdeling uit WBI2017 voor een gesloten zode bij de kleinste golfklasse te hanteren; dit is de gunstigste kansverdeling ('G 0 tot 1' in [Figuur 4-3](#)). Dit resulteert in een faalkans op hoogte van 1/169.000. Dit is de uiteindelijke faalkans voor deze strekking.



A.2.2 Duiding

Uit de analyse resulteert een faalkans op doorsnedeniveau van 1/169.000. Kijkend naar de berekende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, valt op dat een overslagdebiet van 1l/s/m slechts eens per 30 jaar voorkomt; hogere overslagdebieten nog veel minder vaak (5l/s/m slechts eens per 600 jaar, 10l/s/m slechts eens per 3.300 jaar, enz.). Dit komt overeen met het beeld dat de beheerder heeft van de kering; deze geeft aan dat er eigenlijk nooit sprake is van overslag, alleen bij stevige storm van wat spatwater.

De grootste faalkansbijdrage voor deze locatie ligt in de overslagdebieten tussen 1 en 50l/s/m; waarbij de faalkansbijdrage over deze hele range vergelijkbaar is. De illustratiepunten bij 1 en 50l/s/m overslag zijn opgenomen in onderstaande tabel. Ter referentie bij de waterstanden: de kruinhoogte ligt op 0,55m+NAP.

Illustratiepunt Overslagdebiet	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte H_s [m]	Windrichting	Windsnelheid [km/u]
1 l/s/m	-0,36	0,59	NW	85,3
50 l/s/m	-0,03	0,84	NW	124,1

Uit bovenstaande blijkt dat de overslagdebieten voornamelijk worden veroorzaakt door storm (NW-richting). Voor significante overslagdebieten zijn zware stormen nodig; voor 1l/s/m al een storm met windkracht 10, voor 50l/s/m zelfs een storm met orkaankracht (windkracht 12). Dit past bij de zeer lage kans die wordt berekend. De kans op overloop voor de berekende doorsnede bedraagt ca. 1/6.000.000. Dit onderschrijft dat overslag voornamelijk wordt veroorzaakt door storm, en niet door de waterstand. Dit volgt ook uit de kansverdeling van het overslagdebiet, die vrij steil verloopt, hetgeen aangeeft dat overslag maatgevend is boven overloop.

A.3 Strekking 3

A.3.1 Analyse

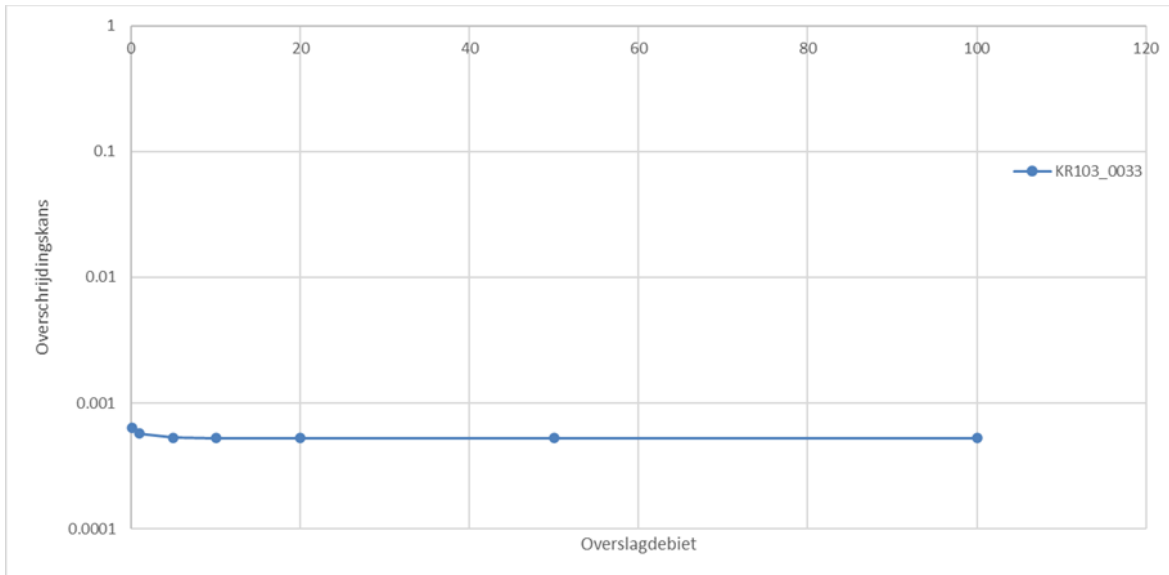
Strekking 3 ligt langs de fictieve regionale rivier. Voor deze rivier is een fictieve waterstandstandoverschrijdingsfrequentie tabel gemaakt die gebruikt is in PROMOTOR als boezemstatistiek. Onderstaande tabel toont deze de gebruikte statistiek.

Frequentie (1/jaar)	Waterstand (m+NAP)
Streefpeil	-0,80
1.00E-01	-0,75
3.33E-02	-0,645
1.00E-02	-0,452
3.33E-03	-0,283
1.00E-03	-0,11
3.23E-05	0,35

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 3. De maatgevende locatie van strekking 3 uit de toetsing van 2015 betreft KR103_0033. In 2022 is deze strekking niet getoetst. Voor deze strekking is geen reden de schematisering van 2015 aan te passen.



Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR. Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/1.900. De kansverdeling van het overslagdebiet toont een erg vlak verloop van de curve; dit duidt erop dat overloop maatgevend is boven golfoverslag.



A.3.2 Duiding

Uit de analyse resulteert een faalkans op doorsnedeniveau van 1/1.900. Kijkend naar de berekende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, valt op dat er weinig verschil is in overschrijdingskansen. Dit betekent dat al vrij snel sprake is van overloop; bij een bepaalde overschrijdingskans treedt overloop op, waarmee direct een zeer groot debiet over de kade loopt.

De grootste faalkansbijdrage voor deze locatie ligt in de overslagdebieten boven de 100 l/s/m. Dit is logisch, aangezien de kans van optreden van overslagdebieten min of meer gelijk zijn, en bij de hoogste debieten de kans op daadwerkelijk falen het grootst is. Het illustratiepunt bij 100 l/s/m overslag is opgenomen in onderstaande tabel. Ter referentie bij de waterstanden: de kruinhoogte ligt op 0,02m+NAP.

Illustratiepunt Overslagdebiet	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte H_s [m]	Windrichting	Windsnelheid [km/u]
100 l/s/m	-0,02	0,03	ZW	26,1

Uit de kansverdeling van het overslagdebiet, die vlak verloopt, viel al op te maken dat overloop maatgevend is boven golfoverslag. Dit volgt ook uit bovenstaande tabel: in het illustratiepunt ligt de waterstand dicht bij de kruin, en er is nauwelijks wind nodig. De berekende kans op overloop is met 1/1.900 gelijk aan de berekende faalkans op hoogte; ook dit onderschrijft dat overloop maatgevend is. Uit een gevoeligheidsanalyse met een kansverdeling van het kritiek debiet op basis van gesloten zode 0-1m golfhoogte (zie Figuur 4-3) volgt bovendien nagenoeg dezelfde faalkans, wat betekent dat de keuze voor een kansverdeling van het kritiek debiet geen invloed heeft.

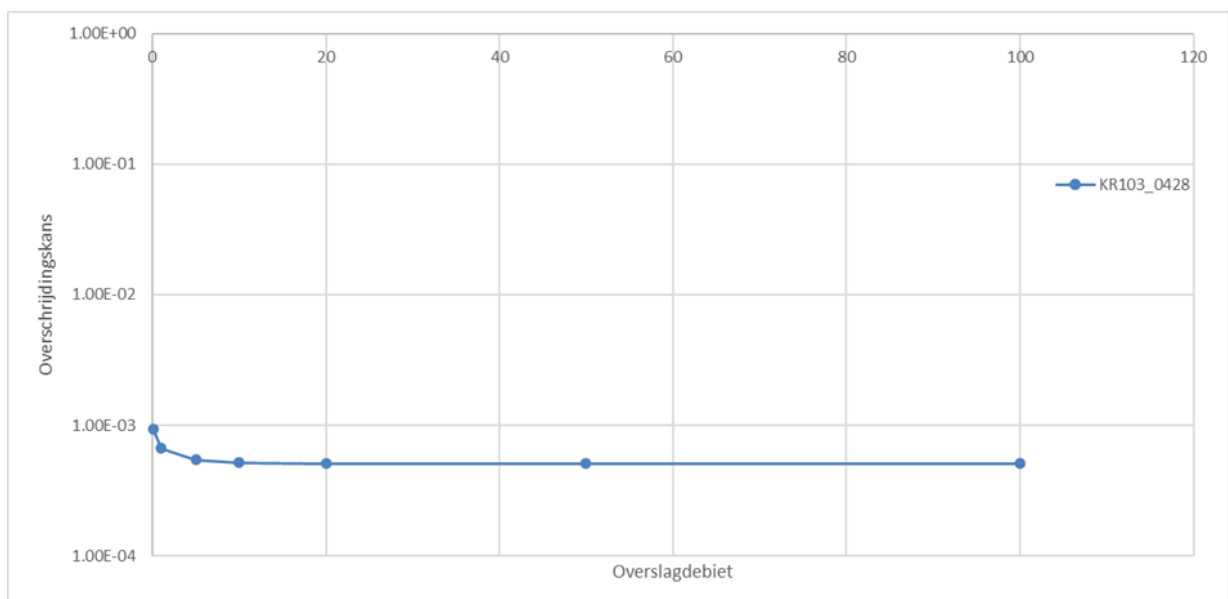
A.4 Strekking 4

A.4.1 Analyse

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 4. Deze strekking is getoetst in 2015, waaruit een overschrijdingskans van het kritiek debiet van 1l/s/m van maximaal 1/170 (jaar) naar voren is gekomen. In de toetsing van 2022 is deze strekking opnieuw getoetst, waarin is gebleken dat de overschrijdingskans van het kritiek debiet minder dan 1/1.000 bedraagt. De maatgevende locatie van strekking 4 uit de toetsing van 2022 betreft KR103_0428. Voor deze strekking is geen reden de schematisering van 2022 aan te passen.



Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR. Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/1.950. De kansverdeling van het overslagdebiet toont een erg vlak verloop van de curve; dit duidt erop dat overloop maatgevend is boven golfoverslag.



A.4.2 Duiding

Uit de analyse resulteert een faalkans op doorsnedeniveau van 1/1.950. Kijkend naar de berekende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, valt op dat er weinig verschil is in overschrijdingskansen. Dit betekent dat al vrij snel sprake is van overloop; bij een bepaalde overschrijdingskans treedt overloop op, waarmee direct een zeer groot debiet over de kade loopt.

De grootste faalkansbijdrage voor deze locatie ligt in de overslagdebieten boven de 100l/s/m. Dit is logisch, aangezien de kans van optreden van overslagdebieten min of meer gelijk zijn, en bij de hoogste debieten de kans op daadwerkelijk falen het grootst is. Het illustratiepunt bij 100l/s/m overslag is opgenomen in onderstaande tabel. Ter referentie bij de waterstanden: de kruinhoogte ligt op -0,07m+NAP.

Illustratiepunt Overslagdebiet	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte H_s [m]	Windrichting	Windsnelheid [km/u]
100 l/s/m	-0,07	0,0	ZW	21,8

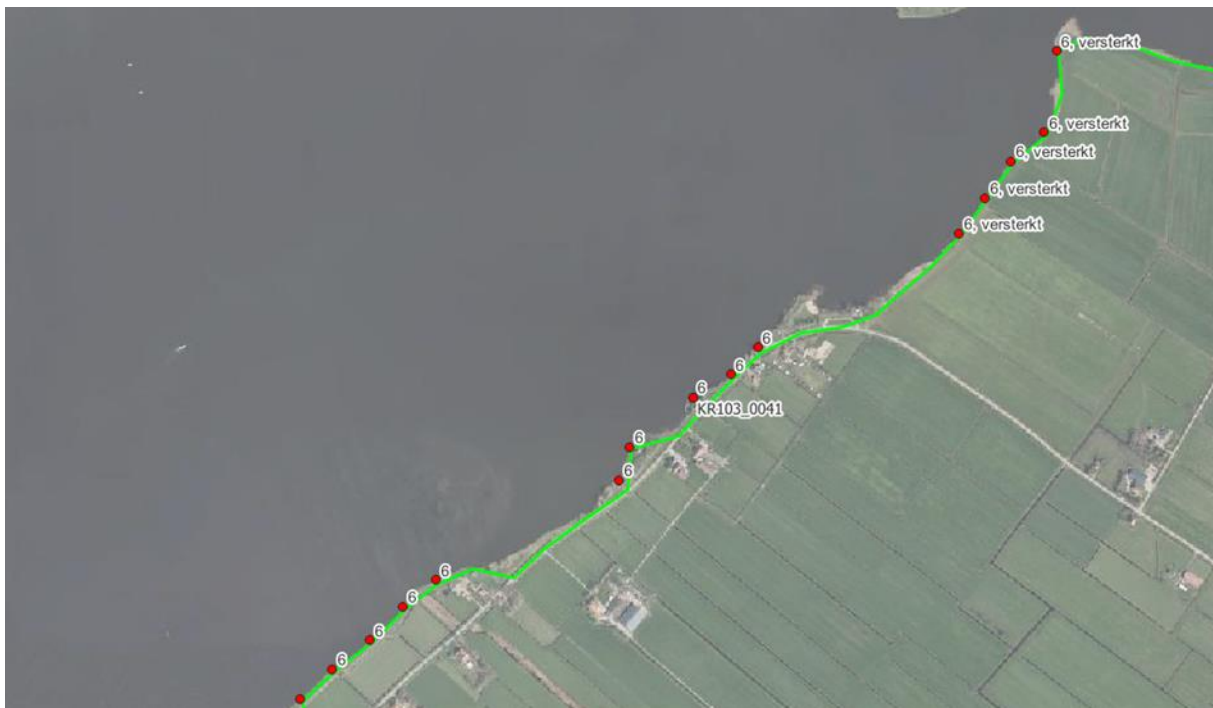
Uit de kansverdeling van het overslagdebiet, die vlak verloopt, viel al op te maken dat overloop maatgevend is boven golfoverslag. Dit volgt ook uit bovenstaande tabel: in het illustratiepunt ligt de waterstand op kruinniveau, en er geen golfwerking, dus eigenlijk geen wind nodig. De berekende kans op overloop is met 1/1.970 vrijwel gelijk aan de berekende faalkans op hoogte; ook dit onderschrijft dat overloop maatgevend is. Uit een gevoeligheidsanalyse volgt bovendien dat de keuze voor een kansverdeling van het kritiek debiet geen invloed heeft.

A.5 Strekking 5

A.5.1 Analyse versterkt deel

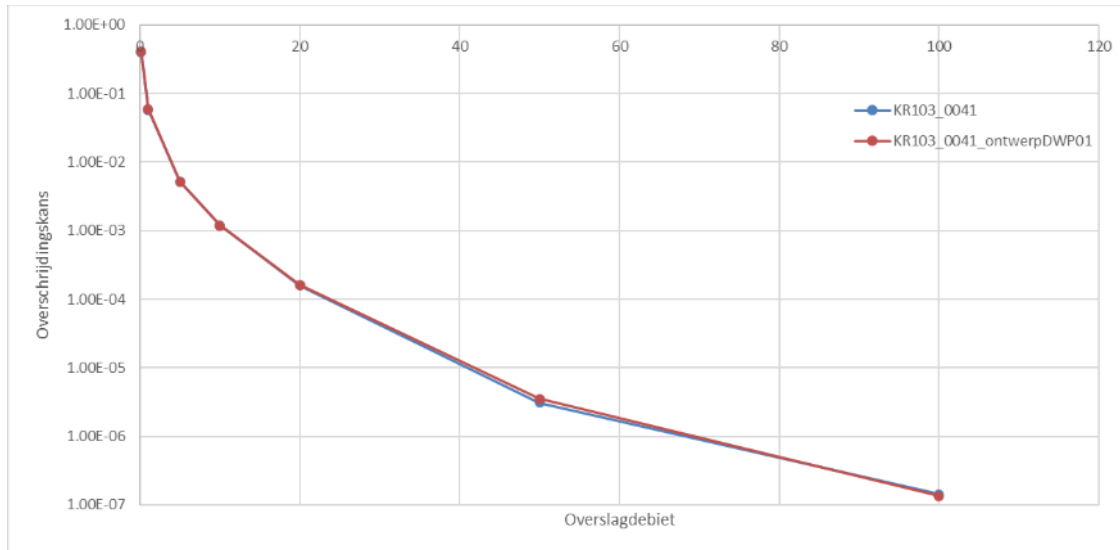
Onderstaande afbeelding toont (zwart omringd) de ligging van strekking 5. De maatgevende locatie van strekking 5 uit de toetsing van 2022 betreft KR103_0041. Net als in strekking 1 en 2, is ook in strekking 5 de kering versterkt: de kering is opgehoogd, het binnentalud verflauwd naar een 1:7 talud, en is breuksteen aangebracht om golven te breken. Deze versterking is echter slechts uitgevoerd op een deel van strekking 5. Deze paragraaf richt zich op dit versterkte deel.

De versterkingsaanpassingen waren in de toetsing van 2022 nog niet doorgevoerd. De schematisatie van 2022 is daarom aangepast: de kruinhoogte is aangepast, en de ruwheid van het buitentalud is verhoogd (breuksteen).



Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR in rood (de blauwe lijn toont ter illustratie de kansverdeling wanneer de ruwheid van het talud niet wordt aangepast). Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/1.680.

Omdat het talud is verflauwd naar een 1:7 talud is de gehanteerde kansverdeling van het kritiek debiet waarschijnlijk veel te conservatief. Immers, een flauw talud faalt minder snel door erosie. Daarom is ervoor gekozen de kansverdeling van het kritiek debiet aan te passen, en de kansverdeling uit WBI2017 voor een gesloten zode bij de kleinste golfklasse te hanteren; dit is de gunstigste kansverdeling. Dit resulteert in een faalkans op hoogte van 1/45.500. Dit is de uiteindelijke faalkans voor deze strekking.



A.5.2 Duiding versterkt deel

Uit de analyse resulteert een faalkans op doorsnedeniveau van 1/45.500. Kijkend naar de berekende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, valt op dat een overslagdebiet van 1l/s/m slechts eens per 15 jaar voorkomt; hogere overslagdebieten nog veel minder vaak (5l/s/m slechts eens per 200 jaar, 10l/s/m slechts eens per 850 jaar, enz.). Dit komt overeen met het beeld dat de beheerder heeft van de kering; deze geeft aan dat er eigenlijk nooit sprake is van overslag, alleen bij stevige storm van wat spatwater.

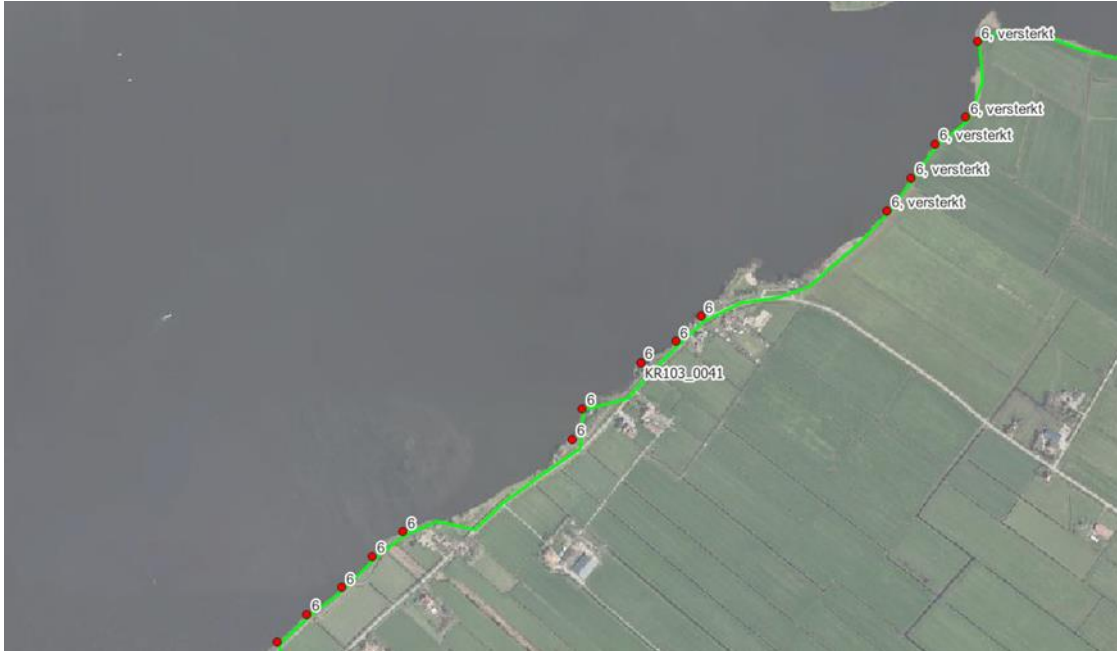
De grootste faalkansbijdrage voor deze locatie ligt in de overslagdebieten tussen 10 en 50l/s/m. De illustratiepunten bij 10 en 50l/s/m overslag zijn opgenomen in onderstaande tabel. Ter referentie bij de waterstanden: de kruinhoogte ligt op 0,80m+NAP.

Illustratiepunt Overslagdebiet	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte H_s [m]	Windrichting	Windsnelheid [km/u]
10 l/s/m	-0,28	0,71	NW	103,5
50 l/s/m	-0,05	0,86	NW	125,5

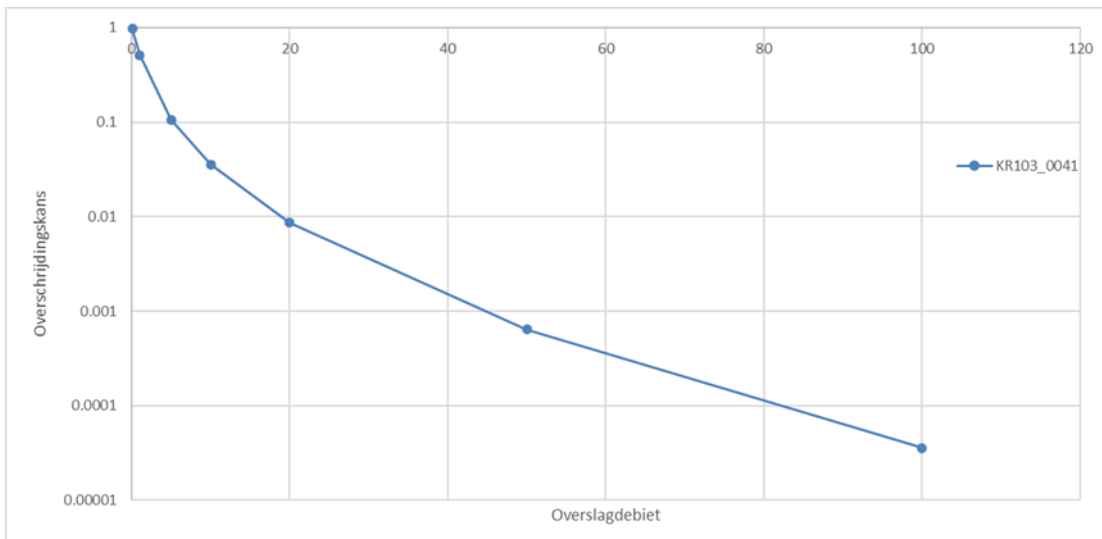
Uit bovenstaande blijkt dat de overslagdebieten voornamelijk worden veroorzaakt door storm (NW-richting). Voor significante overslagdebieten zijn zware stormen nodig; voor 10l/s/m een storm met windkracht 11, voor 50l/s/m zelfs een storm met orkaankracht (windkracht 12). Dit past bij de zeer lage kans die wordt berekend. De kans op overloop voor de berekende doorsnede bedraagt ca. 1/150.000.000. Dit onderschrijft dat overslag voornamelijk wordt veroorzaakt door storm, en niet door de waterstand. Dit volgt ook uit de kansverdeling van het overslagdebiet, die vrij steil verloopt, hetgeen aangeeft dat overslag maatgevend is boven overloop.

A.5.3 Analyse niet-versterkt deel

Deze paragraaf richt zich op het niet versterkte deel van strekking 5. De berekening voor dit deel is gebaseerd op dezelfde locatie uit de toetsing van 2022, namelijk KR103_0041. Voor dit deel van de strekking is geen reden de schematisering van 2022 aan te passen, omdat er geen versterking is uitgevoerd.



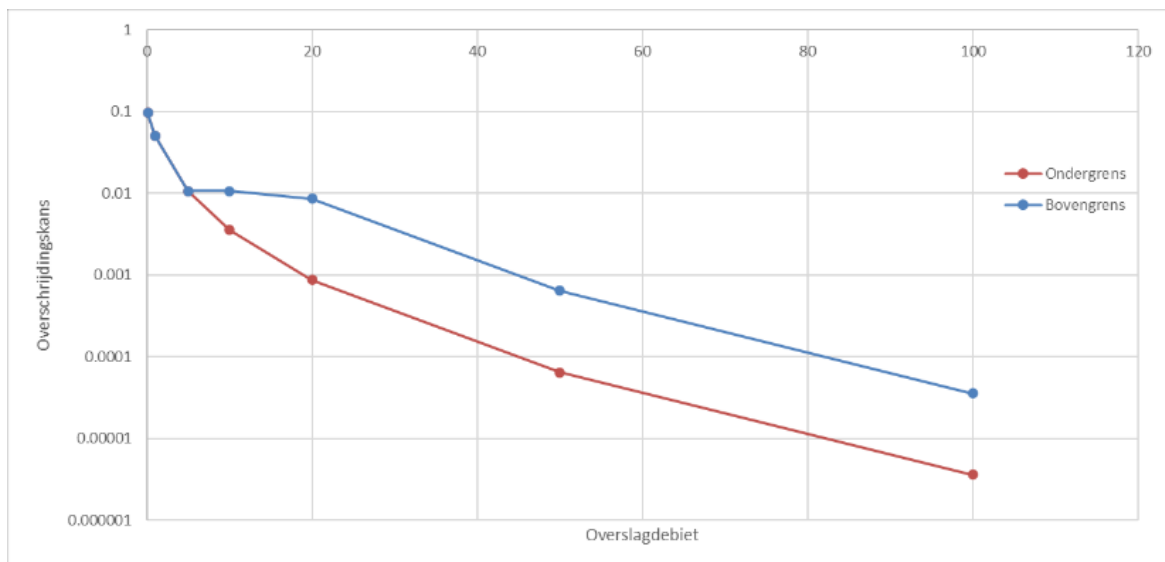
Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR. Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/90.



Uit bovenstaande kansverdeling volgt bovendien dat er bijna elk jaar een overslagdebiet van 1l/s/m over de kering gaat, en dat een overslagdebiet van 5l/s/m ongeveer eens per 10 jaar voorkomt. Dit komt niet overeen met het beeld van de beheerder, die aangeeft dat hij niet bekend is met overslaand water, alleen met wat spatwater over de kering, en dit alleen bij zware storm.

Op basis van de kennis van de beheerder is daarom bovenstaande kansverdeling van het kritiek debiet aangepast. Voor de overslagdebieten tot en met 5l/s/m is de overschrijdingskans met een factor 10 gereduceerd (waarbij de overschrijdingskans van hogere debieten in elk geval niet groter mag zijn); deze debieten hebben in de oorspronkelijke berekening een overschrijdingskans tot eens per 10 jaar, en zijn daarmee te relateren aan de kennis en ervaring van de beheerder. Onderstaande figuur toont de resulterende kansverdeling in blauw. Deze kansverdeling is enigszins vreemd: een overslagdebiet van 20l/s/m komt even vaak voor als een overslagdebiet van 5 en 10l/s/m. Deze kansverdeling kan worden gezien als een soort bovengrens. Onderstaande figuur toont ook een ondergrens (in rood), waarbij niet alleen de overschrijdingskans van de overslagdebieten tot en met 5l/s/m met factor 10 zijn gereduceerd, maar alle overslagdebieten. Hier valt ook iets voor te zeggen, omdat hiermee wordt aangenomen dat de oorspronkelijke berekening voor de hogere debieten een even grote 'fout' (factor 10) maakt dan de lagere debieten.

Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/265 voor de bovengrens, en 1/920 voor de ondergrens. In het kader van de voorbeelduitwerking is de ondergrens (1/920) gekozen als de uiteindelijk jaarlijkse faalkans voor deze strekking.



A.5.4 Duiding niet-versterkt deel

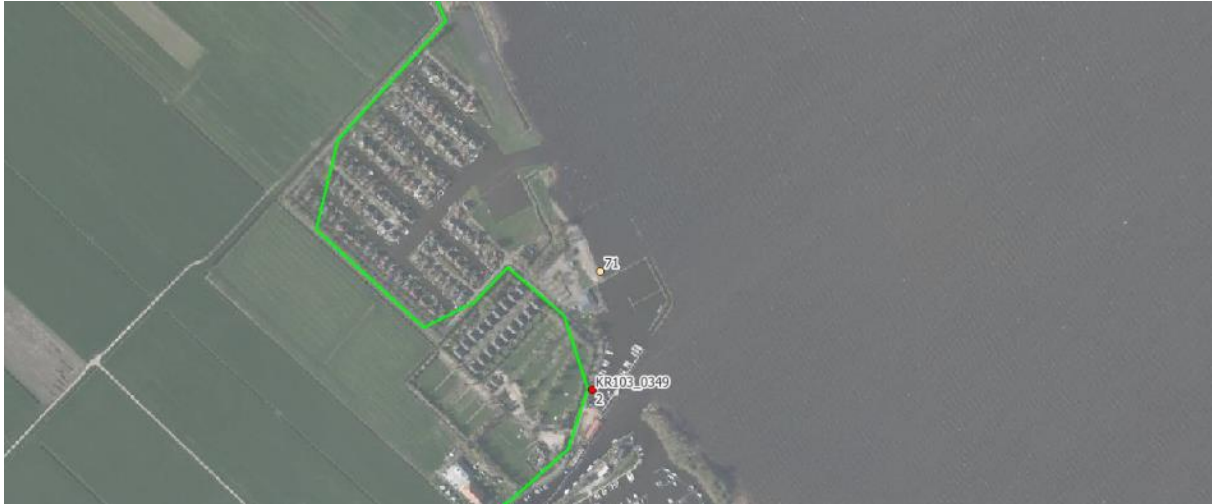
Uit de analyse resulteert een faalkans op doorsnedeniveau tussen 1/265 (ondergrens) en 1/920 (bovengrens). Hierbij is de kansverdeling van het overslagdebiet al aangepast naar kennis en ervaring van de beheerder. Hierdoor gelden de illustratiepunten van de oorspronkelijke berekening niet meer.

Uit de berekeningen volgt wel dat de overslagdebieten voornamelijk worden veroorzaakt door storm (NW-richting). De kans op overloop voor de berekende doorsnede bedraagt ca. 1/523.000. Dit onderschrijft dat overslag voornamelijk wordt veroorzaakt door storm, en niet door de waterstand. Dit volgt ook uit de kansverdeling van het overslagdebiet, die vrij steil verloopt, hetgeen aangeeft dat overslag maatgevend is boven overloop.

A.6 Strekking 6

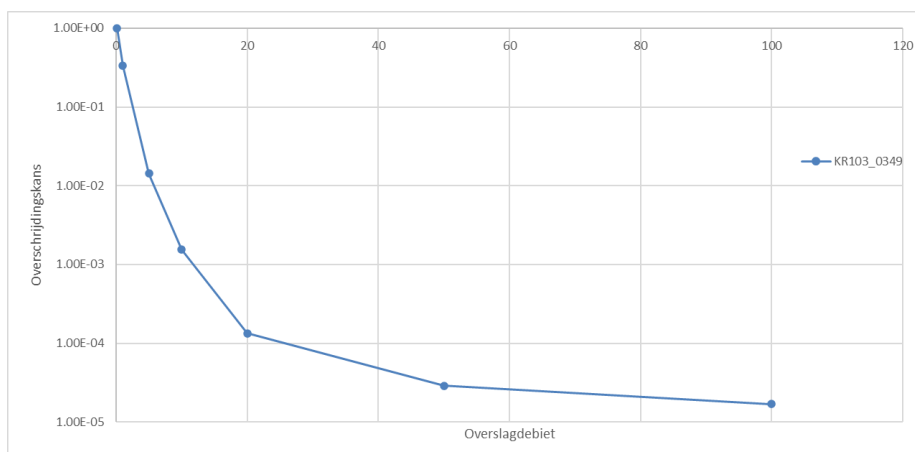
A.6.1 Analyse

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 6. De maatgevende locatie van strekking 6 uit de toetsing van 2022 betreft KR103_0349. Voor deze strekking is geen reden de schematisering van 2022 aan te passen.



Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR. Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/440. De illustratiepunten laten zien dat overslag voor deze locatie voornamelijk wordt veroorzaakt door een ONO-storm. Wel laat onderstaande kansverdeling zien dat overloop op deze locatie belangrijker is dan bij de hierboven beschreven locaties; voor overslagdebieten vanaf 20l/s/m gaat de curve namelijk steeds vlakker verlopen, hetgeen betekent dat overloop een grotere rol gaat spelen.

De berekende overschrijdingskansen (en de resulterende jaarlijkse faalkans van 1/440) lijken te hoog, in vergelijking met ervaringen van het beheerder. Zo wordt berekend dat elke 3 jaar 1l/s/m overslag optreedt. En overslagdebieten tussen 1 en 5l/s/m, die het meest bijdragen aan de jaarlijkse faalkans, komen volgens de berekening eens per 3 tot 70 jaar voor. De beheerder is echter niet bekend met significante overslag op deze locatie.



Omdat de rekenresultaten niet overeenkomen met de ervaring van de beheerder, is hieronder verder ingezoomd op de lokale situatie. Onderstaande afbeelding toont in rood de ligging van de beschouwde doorsnede KR103_0349. De beschouwde locatie ligt achter een haven, en wordt door beschermd tegen golven vanuit ONO-richting. Hierboven is al geconcludeerd dat juist ONO-storm de oorzaak is van golfoverslag. Deze locatie wordt dus beschermd tegen golfoverslag door de haven. Op basis daarvan kan worden gesteld dat golfoverslag niet relevant is voor KR103_0349. Falen op hoogte kan daarom enkel optreden als gevolg van overloop, met een bijbehorende kans van 1/67.000. De faalkans voor deze locatie kan daarmee worden gereduceerd tot 1/67.000.



Een locatie waar golfoverslag wel relevant kan zijn, en die daarom mogelijk maatgevend is voor deze strekking, is weergegeven met de gele stip (net buiten de haven). Hier is echter een zeer hoog voorland aanwezig (hoger dan de kering in strekking 6), waardoor ook deze locatie niet zal falen op hoogte.

A.6.2 Duiding

In bovenstaande paragraaf zijn de resultaten van de oorspronkelijke berekening al aangepast naar de lokale situatie, zodat de resultaten de werkelijkheid zo goed mogelijk beschrijven. Hier is geen verdere duiding nodig.

Aandachtspunt is wel dat strekking 6 oorspronkelijk is gekozen als maatgevende strekking langs het Slotermeer. Door de aanpassingen (golfoverslag niet relevant) is dit mogelijk niet meer het geval. Daarom is een aanvullende strekking beoordeeld in het noorden van het Slotermeer, strekking 7.

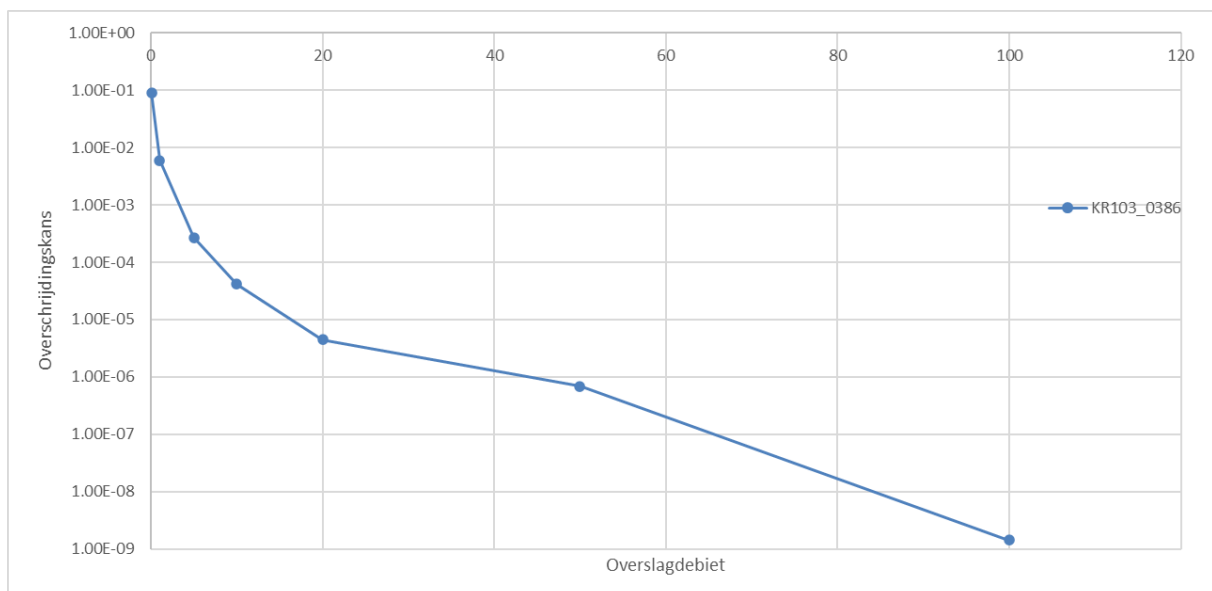
A.7 Strekking 7

A.7.1 Analyse

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 7. De maatgevende locatie van strekking 7 uit de toetsing van 2022 betreft KR103_0386. Voor deze strekking is geen reden de schematisering van 2022 aan te passen.



Onderstaande afbeelding toont de resulterende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, berekend met PROMOTOR. Combineren met de kansverdeling van het kritiek debiet resulteert in een jaarlijkse faalkans van 1/21.500. De illustratiepunten laten zien dat overslag voor deze locatie voornamelijk wordt veroorzaakt door een ZZW-storm.



A.7.2 Duiding

Uit de analyse resulteert een faalkans op doorsnedeniveau van 1/21.500 per jaar. Kijkend naar de berekende kansverdeling van het optredend overslagdebiet, valt op dat een overslagdebiet van

1l/s/m slechts eens per 150 jaar voorkomt; hogere overslagdebieten nog veel minder vaak (5l/s/m slechts eens per 3.700 jaar, 10l/s/m slechts eens per 24.000 jaar, enz.). Dit komt overeen met het beeld dat de beheerder heeft van de kering; deze geeft aan dat er eigenlijk nooit sprake is van overslag, alleen bij stevige storm van wat spatwater.

De grootste faalkansbijdrage voor deze locatie ligt in de overslagdebieten tussen 1 en 5l/s/m. De illustratiepunten bij 1 en 5l/s/m overslag zijn opgenomen in onderstaande tabel. Ter referentie bij de waterstanden: de kruinhoogte ligt op 0,87m+NAP.

Illustratiepunt Overslagdebiet	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte H_s [m]	Windrichting	Windsnelheid [km/u]
1 l/s/m	-0,27	0,64	ZZW	87,5
5 l/s/m	-0,20	0,73	ZZW	101,7

Uit bovenstaande blijkt dat de overslagdebieten voornamelijk worden veroorzaakt door storm (ZZW-richting). Voor significante overslagdebieten zijn zware stormen nodig; voor 5 l/s/m (met een grote faalkansbijdrage) al een storm met windkracht 10 a 11. Dit past bij de relatief lage kans die wordt berekend. De kans op overloop voor de berekende doorsnede bedraagt ca. 1/444.000.000. Dit onderschrijft dat overslag voornamelijk wordt veroorzaakt door storm, en niet door de waterstand. Dit volgt ook uit de kansverdeling van het overslagdebiet, die vrij steil verloopt, hetgeen aangeeft dat overslag maatgevend is boven overloop.

B Stabiliteit

Voor de bepaling van de faalkans op binnenwaartse stabiliteit zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd in de voorbeelduitwerking:

- Voor elke strekking is de maatgevende locatie gekozen. Voor deze locatie is een probabilistische berekening gemaakt met D-Stability v2023.01.
- De probabilistische berekeningen zijn gemaakt aan de hand van 3D-fragility curves. Een 3D-fragility curve geeft de conditionele faalkans gegeven een combinatie van twee variabele belastingen.
- Verondersteld is dat de freatische lijn (door buitenwaterstand of neerslag) en de verkeerslast de drijvende belastingen zijn voor binnenwaartse stabiliteit. Deze belastingen zijn als variabele belastingen in de 3D-fragility curves gehanteerd.
- De grondopbouw in de berekening is gebaseerd op de gehanteerde ondergrondscenario's, gecombineerd met lokale informatie (boringen en sonderingen). In de voorbeelduitwerking is niet gewerkt met meerdere scenario's, maar wordt de lokaal aanwezige grondopbouw geschematiseerd. Indien lokale informatie ontbreekt, wordt een aanname gedaan voor de aanwezige grondopbouw. Voor het doel van deze voorbeelduitwerking volstaat dit.
- Als sterktemodel is het Mohr-Coulomb model gebruikt, aangezien dit gangbaar is voor regionale keringen. De sterkteparameters (cohesie (c) en wrijvingshoek (ϕ)) zijn ingevoerd als stochasten, op basis van een lognormale verdeling met een verwachtingswaarde en standaard deviatie. De stochastische verdelingen zijn afgeleid uit de proevenverzameling van Wetterskip Fryslân die gebruikt is voor de sterkteparameters in de toetsing van 2015.
 - Op basis van de gegevens uit de proevenverzameling zijn met behulp van lineaire regressie de verwachtingswaarde en karakteristieke waarde bepaald (5%-ondergrens, rekening houdend met regionale spreiding). De standaarddeviatie is vervolgens zo gekozen, dat D-Stability op basis van de standaarddeviatie en de verwachtingswaarde uitkomt op de karakteristieke waarde die volgt uit de lineaire regressie.
 - De volumieke gewichten zijn ingevoerd als deterministische waarden (aangezien deze zowel positief als negatief bijdragen aan de stabiliteit), en zijn ook gebaseerd op dezelfde proevenverzameling. Onderstaande Tabel toont de gehanteerde sterkteparameters.

Grondsoort	Volumiek Gewicht	Cohesie (c)			Wrijvingshoek (ϕ)		
		Mean	Std	Kar	Mean	Std	Kar
Klei (dijksmateriaal en ondiep)	14,5	3,3	0,534	2,5	36,4	4,15	30,0
Klei (diep)	17,0	3,3	0,534	2,5	36,4	4,15	30,0
Veen	10,5	5,0	3,4	1,5	23,6	2,31	20,0
Zand*	18/20	0	0	0	34,0	2,53	32,0

* De sterkteparameters voor zand zijn gebaseerd op de schematiseringshandleiding macrostabiliteit

- De stijghoogte in het watervoerend pakket is gebaseerd op de toetsing van 2015, gecombineerd met lokale peilbuisgegevens uit DINO-loket (indien beschikbaar). Verondersteld wordt dat de stijghoogte niet wordt beïnvloed door boezem- of meerpeil, en is daarom als determinist ingevoerd.

- Voor de verkeersbelasting is uitgegaan van drie scenario's/belastinggevallen¹³:
 - Een dagelijkse verkeerslast van 1kPa, met een frequentie van eens per dag;
 - Een verkeerslast van 5kPa, met frequentie afhankelijk van het soort weg dat op de kering aanwezig is:
 - Geen weg: verkeerslast is zeldzaam, enkel als gevolg van maaien van de kade, frequentie van eens per jaar;
 - Kleine (lokale) weg: verkeer is vaker mogelijk, frequentie van eens per maand;
 - Grotere ontsluitingsweg: verkeer komt vaak voor, frequentie eens per dag.
 - Een zware verkeerslast van 13kPa, met een frequentie van eens per 10 jaar.
- Voor de freatische lijn is uitgegaan van drie scenario's/belastinggevallen¹⁴:
 - FL2: Een jaarlijks maximum, waarbij de freatische lijn zowel t.p.v. de buitenkruinlijn als binnenkruinlijn op streefpeil ligt, en vandaaruit lineair naar de binnenteen loopt. Dit scenario heeft een overschrijdingsfrequentie van eens per jaar;
 - FL4: Een volledig verzadigde dijk, waarbij de freatische lijn op 10cm het dijkprofiel volgt. Van dit scenario wordt verondersteld dat het wordt veroorzaakt door ofwel een T=100 jaar neerslag bui, ofwel door 10l/s/m overslag (en infiltrerend water). De kans van optreden is daarom gelijk aan het maximum van 1/100 en de lokale kans op 10l/s/m overslag.
 - FL3: Een half verzadigde dijk, waarbij de freatische lijn midden tussen FL2 en FL4 in ligt. Van dit scenario wordt verondersteld dat het wordt veroorzaakt door ofwel een T=10 jaar neerslag bui, ofwel door 1l/s/m overslag (en infiltrerend water). De kans van optreden is daarom gelijk aan het maximum van 1/10 en de lokale kans op 1l/s/m overslag.
- Voor het opstellen van de 3D-fragility curve wordt voor elke mogelijke combinatie van een freatische lijn (FL2, FL3 of FL4) en verkeerslast (1, 5 of 13 kPa), in totaal 9 discrete combinaties, de conditionele faalkans bepaald. Aangenomen is dat er altijd sprake is van één van de negen belastingcombinaties. De 9 belastingssituaties hebben kansen op dagbasis die gelijk zijn aan het product van de dagkans op een bepaalde freatische lijn en de voorwaardelijke kans dat er dan sprake is van een bepaalde verkeerslast. Vervolgens worden (op dagbasis) de conditionele faalkansen vermenigvuldigd met de kansen van optreden van de belastingssituaties, om per belastingssituatie de kans te verkrijgen dat de kering faalt door die belastingcombinatie.
- De belastingssituaties zijn "mutually exclusive & collectively exhaustive", zodat de faalkans op dagbasis gelijk is aan de som¹⁵ van de faalkansen op dagbasis per belastingssituatie. De faalkans wordt uiteindelijk weer omgerekend (*365) naar een jaarlijkse faalkans.
- Om rekening te houden met het gelijktijdig optreden van de belastingen (hoge freatische lijn gecombineerd met hoge verkeerslast) worden de kansen van optreden ingevoerd in dagelijkse kansen. Hierbij wordt verondersteld dat een scenario voor de freatische lijn gemiddeld 7 dagen aanhoudt, en een scenario voor de verkeerslast 1 dag. Dit onder de (conservatieve) veronderstelling dat er geen sprake is van afhankelijkheid tussen de dagen.

Een illustratief voorbeeld van de 3D-fragility curve (met negen belastingcombinaties) is op de volgende pagina weergegeven.

¹³ De frequenties van de verkeersbelastingsscenario's zijn als volgt vertaald in dagelijkse kansen (ofwel dagkansen). Een verkeersbelasting die dagelijks voorkomt heeft een frequentie die gelijk is aan de frequentie van de verkeersbelasting maal 365/365, een verkeersbelasting die maandelijks voorkomt heeft een frequentie die gelijk is aan de frequentie van de verkeersbelasting maal 12/365 en een verkeersbelasting die jaarlijks voorkomt heeft een frequentie die gelijk is aan de frequentie van de verkeersbelasting maal 1/365.

¹⁴ De jaarlijkse overschrijdingsfrequenties van de freatische lijn scenario's zijn vertaald in dagelijkse kansen (ofwel dagkansen). Hier is aangenomen dat een freatische lijn gemiddeld één week aanhoudt. De frequentie van de freatische lijn is daarmee gelijk aan de jaarlijkse frequentie van het scenario maal 7/365.

¹⁵ In deze casus is gebruik gemaakt van de middelpuntsregel (of de "middelpunt-Riemann-som") voor het uitintegreren van de discrete belastingssituaties om tot een faalkans te komen.

3D-fragility curve	P(VB=1)	P(VB=5)	P(VB=13)
P(FL2)	Pf(STBI FL2, VB=1)	Pf(STBI FL2, VB=5)	Pf(STBI FL2, VB=13)
P(FL3)	Pf(STBI FL3, VB=1)	Pf(STBI FL3, VB=5)	Pf(STBI FL3, VB=13)
P(FL4)	Pf(STBI FL4, VB=1)	Pf(STBI FL4, VB=5)	Pf(STBI FL4, VB=13)

Illustratief voorbeeld van een 3D-fragility curve, met conditionele faalkansen gegeven FL en VB.

Versterkte Streckingen kadering

Tot slot zijn sinds de toetsing van 2015 een aantal strekkingen versterkt, waarbij de kruin is opgehoogd en het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 helling. Van deze strekkingen zijn de faalkansen als verwaarloosbaar beschouwd. Dit gaat om een deel van strekking 1, strekking 2 en een deel van strekking 3. In onderstaand Figuur 7-1 zijn de versterkte strekkingen weergegeven.



Figuur 7-1 Versterkte strekkingen(Rinsum van G.P., 2022).

B.1 Strekking 1

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 1. De maatgevende doorsnede van strekking 1 uit de toetsing van 2015 betreft KR103_0049. Deze locatie is zwart omcirkeld in onderstaande afbeelding. Een deel van strekking 1 is recent versterkt, waarbij de kruin is opgehoogd en het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 talud. Het versterkte deel is rood omcirkeld in onderstaande afbeelding; de maatgevende doorsnede van de strekking bevindt zich overigens niet in dit deel maar langs de regionale rivier. Paragraaf B.1.1 richt zich op het versterkte deel en paragraaf B.1.2 gaat in op het niet versterkte deel.



B.1.1 Versterkte deel

In strekking 3 van de kadering is ook een versterkt deel van de kering aanwezig (zie paragraaf B.3.1).

Uit de berekeningen voor strekking 3 volgt dat na uitintegreren van de 3D-fragility curve een jaarlijkse faalkans van $5,9E-10$. Deze faalkans kan als verwaarloosbaar worden beschouwd ten opzicht van het niet versterkte deel van strekking 3 met een faalkans van $2,3E-04$ (1/4.400). Een dergelijk verschil in faalkans valt ook in de lijn der verwachting voor het versterkte deel van strekking 1, gezien het flauwe binnentalud dat ook hier in de dijkversterking is aangelegd. Daarom is voor het versterkte deel van strekking 1 een verwaarloosbare faalkans aangenomen

B.1.2 Niet versterkte deel

De schematisering uit de toetsing van 2015 is als basis gebruikt. Deze is op specifieke punten aangepast en geschikt gemaakt voor de voorbeelduitwerking conform de generieke uitgangspunten. Enkele specifieke uitgangspunten zijn hieronder beschreven.

Geometrie/dijkprofiel

De beschouwde doorsnede in deze paragraaf is sinds de toetsing van 2015 niet versterkt. Om met de meest recente informatie te rekenen, is een nieuw dwarsprofiel afgeleid op basis van AHN4.

Grondopbouw

In strekking 1, en ter plaatse van KR103_0049 is gering lokaal grondonderzoek beschikbaar. De originele ondergrondscenario's uit de toetsing zijn vergeleken met het beschikbare grondonderzoek, en de ondergrond is geschematiseerd vergelijkbaar aan scenario's *segment_305_1D3* en *segment_305_1D4* (beide goed voor 70% bijdrage in de toetsing uit 2015). De ondergrond is als volgt geschematiseerd:

Van [m+NAP]	Tot [m+NAP]	Grondsoort
Maaiveld	-1,1	Klei
-1,1	-2,7	Veen
-2,7	-	Zand

Stijghoogte watervoerend pakket

De stijghoogte in het watervoerend pakket is gebaseerd op een beschikbare peilbuis uit DINO-loket, genaamd B15E0118-001. De stijghoogte is op basis van deze peilbuis ingeschat op een gemiddelde waarde van -1,40m+NAP.

Kansen van voorkomen scenario's freatische lijn

De kansen van voorkomen van de scenario's voor de freatische lijn zijn voor de betreffende locatie als volgt:

- Scenario FL2 (jaarlijks maximum) heeft een jaarlijkse kans van voorkomen van 1, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/365.
- Voor scenario FL3 is neerslag maatgevend: de jaarlijkse kans op 1l/s/m overslag bedraagt, op basis van de hoogteberekening bij KR103_0033 (hoogte strekking 1) 6, 1/26.250, en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/10. Scenario FL3 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/10, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/3.650.
- Voor scenario FL4 is neerslag ook maatgevend: de jaarlijkse kans op 10l/s/m overslag bedraagt 1/29.500 en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/100. Scenario FL4 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/100, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/36.500.

Kansen van voorkomen scenario's verkeerslast

Op het niet versterkte deel van strekking 1 is een lokale weg aanwezig. Voor de dagelijkse kans op het voorkomen van een verkeerslast van 5kPa is hier 12/365 (maandelijks) aangenomen. Voor de overige kansen wordt verwezen naar paragraaf 4.3.

Resultaten en duiding

Uit de berekeningen van de conditionele faalkansen gegeven een combinatie van twee variabele belastingen volgt de 3D-fragility curve. Deze is in onderstaande tabel weergegeven. Na uitintegreren van de curve volgt een dagelijkse faalkans op doorsnedeniveau van 3,7E-06, dit komt neer op een jaarlijkse faalkans van 1,3E-03 (1/750).

3D-fragility curve	VB=1	VB=5	VB=13
FL2	1.62E-15	1.99E-13	1.65E-06
FL3	1.86E-08	2.95E-08	1.67E-03
FL4	3.62E-04	1.62E-03	1.33E-01

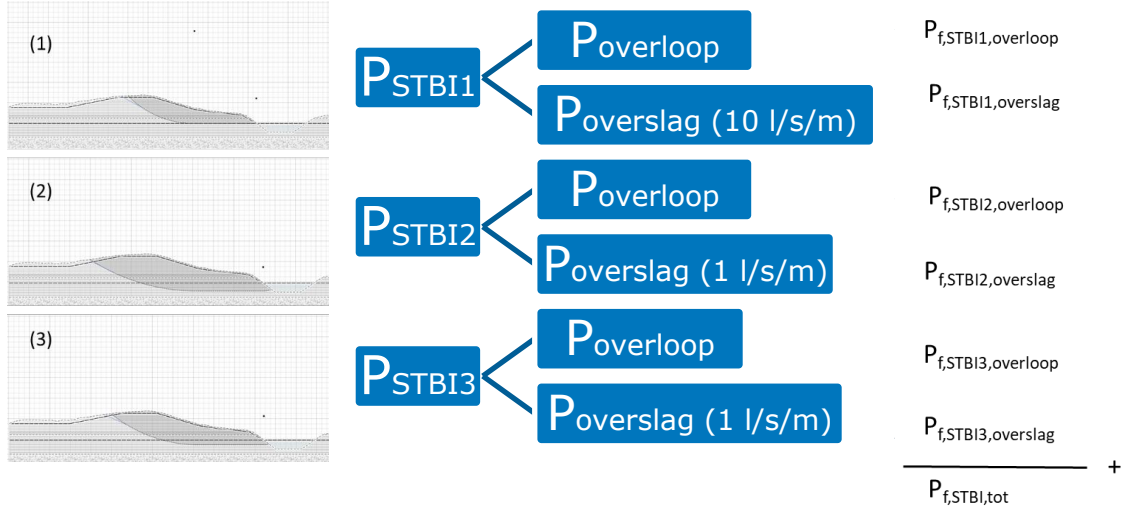
Vervolgens is onderzocht of de faalkans verder valt aan te scherpen, door het complete faalpad tot aan overstromen te beschrijven. Een initiële afschuiving in strekking 1 is gedomineerd/veroorzaakt

door neerslag (maatgevend over golfoverslag in de freatische lijn scenario's). Echter resteert er nog een restprofiel welke door golfoverslag/overloop dient te bezwijken om tot een overstroming te leiden. Deze vervolgmecanismen worden meegenomen in het gehele faalpad.

Onderstaande figuur toont de gehanteerde faalboom. Uitleg hierbij is als volgt:

- Onderstaande faalboom is beschouwd voor de maatgevende belastingscenario's FL3 en FL4 met elk een verkeersbelasting van 13 kPa (VB=13). Het resultaat van de faalboom is daarmee de overstromingskans gegeven de combinatie van freatische lijn en verkeerslast. Door deze kansen uit te integreren (over de kansverdelingen van deze belastingen) volgt de dagelijkse en jaarlijkse overstromingskans.
- Er zijn drie mogelijke vormen van een mogelijke (initiële) afschuiving beschouwd: een afschuiving door de kruin (1), een afschuiving waarbij vrijwel het gehele dijklichaam verdwijnt (2) en een afschuiving met intredepunt tussen 1 en 2 in (3). Voor elk van deze afschuivvormen is de kans op een afschuiving bepaald aan de hand van een probabilistische berekening.
- Na elk van de mogelijke afschuivingen (afschuivvormen) resteert een restprofiel. Dit restprofiel is per afschuivvorm bepaald met behulp van TR actuele sterkte bij dijken (ENW, 2009).
- Een overstroming treedt op als het restprofiel verder wordt aangetast als gevolg van overloop of golfoverslag. Verondersteld is dat bij afschuivvorm door de kruin (1) 10l/s/m overslag nodig is om tot doorgaande erosie te leiden (omdat nog een relatief groot restprofiel over is), bij de overige afschuivvormen (2) en (3) 1l/s/m overslag. De kansen op overloop en overslag zijn, gegeven de resterende hoogte van het restprofiel, bepaald met behulp van PROMOTOR. Aandachtspunt hierbij is dat deze vervolgmecanismen moeten optreden voordat de kering is hersteld na de initiële afschuiving; hierbij is een hersteltijd van 1 maand aangehouden.
- De totale kans voor een van de paden uit de faalboom volgt uit het product van de afzonderlijke knopen. Dit omdat de knopen als onafhankelijk kunnen worden beschouwd. Voor deze locatie langs de (fictieve) rivier is aangenomen dat het vervolgmecanisme overloop maatgevend is boven overslag. Overloop wordt voor de betreffende strekking veroorzaakt door een hoge afvoer, terwijl een afschuiving wordt veroorzaakt door neerslag (en verkeerslast). Deze events kunnen als onafhankelijk worden beschouwd.
De totale kans voor een van de paden is dus gelijk aan het product van de knopen in het pad. De totale overstromingskans (gegeven een belastingcombinatie) is gelijk de som van de kansen op de verschillende paden, zoals weergegeven in onderstaande figuur.

Na uitvoeren van de faalpadanalyse, en opnieuw uitintegreren, volgt een overstromingskans voor strekking 1 (niet versterkte deel) van 1/99.000.



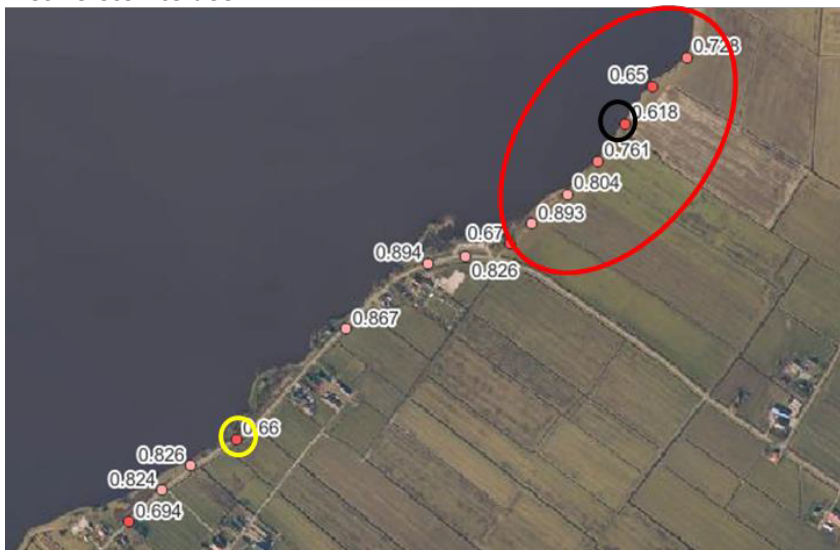
B.2 Strekking 2

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 2. De maatgevende doorsnede van strekking 2 uit de toetsing van 2015 betreft KR103_0184. Deze locatie is zwart omcirkeld in onderstaande afbeelding. De gehele strekking 2 is recent versterkt, waarbij de kruin is opgehoogd en het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 talud. Dit is in rood omcirkeld in onderstaande afbeelding; de maatgevende doorsnede van de strekking is in zwart omcirkeld. Omdat deze strekking geheel versterkt is wordt er geen stabiliteitsberekening uitgevoerd.



B.3 Strekking 3

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 3. De maatgevende doorsnede van strekking 3 uit de toetsing van 2015 betreft KR103_0180. Deze locatie is zwart omcirkeld in onderstaande afbeelding. Een deel van strekking 3 is recent versterkt, waarbij de kruin is opgehoogd en het binnentalud is verflauwd naar een 1:7 talud. Het versterkte deel is rood omcirkeld in onderstaande afbeelding; de maatgevende doorsnede van de strekking bevindt zich ook in dit deel. De maatgevende locatie in het niet versterkte deel is in geel omcirkeld, dit betreft KR103_0168. Paragraaf B.3.1 richt zich op het versterkte deel en paragraaf B.3.2 gaat in op het niet versterkte deel.



B.3.1 Versterkte deel

De schematisering uit de toetsing van 2015 is als basis gebruikt. Deze is op specifieke punten aangepast en geschikt gemaakt voor de voorbeelduitwerking conform de generieke uitgangspunten. Enkele specifieke uitgangspunten zijn hieronder beschreven.

Geometrie/dijkprofiel

Sinds de toetsing van 2015 is de dijk versterkt, waarbij de kruin is opgehoogd en het binnentalud is verflauwd naar 1:7. In de schematisering van de voorbeelduitwerking is de geometrie geschematiseerd op basis van het ontwerp van de dijkversterking.

Grondopbouw

In strekking 3, en ter plaatse van KR103_0180 is voldoende lokaal grondonderzoek beschikbaar vanuit de uitgevoerde dijkversterking. De originele ondergrondscenario's uit de toetsing komen daarmee te vervallen, en de ondergrond is geschematiseerd op basis van lokaal grondonderzoek. De ondergrond is als volgt geschematiseerd:

Van [m+NAP]	Tot [m+NAP]	Grondsoort
Maaiveld	-0,5	Klei
-0,5	-0,9	Veen
-0,9	-1,2	Klei
-1,2	-2,5	Veen
-2,5	-	Zand

Stijghoogte watervoerend pakket

De stijghoogte in het watervoerend pakket is gebaseerd op een beschikbare peilbuis uit DINO-loket, genaamd B15E0213-001. De stijghoogte is op basis van deze peilbuis ingeschat op een hoog-gemiddelde waarde van 1,50m+NAP.

Kansen van voorkomen scenario's freatische lijn

De kansen van voorkomen van de scenario's voor de freatische lijn zijn voor de betreffende locatie als volgt:

- Scenario FL2 (jaarlijks maximum) heeft een jaarlijkse kans van voorkomen van 1, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/365.
- Voor scenario FL3 is neerslag maatgevend: de jaarlijkse kans op 1l/s/m overslag bedraagt, op basis van de hoogteberekening bij KR103_0041 (hoogte strekking 6, versterkte deel) 6, 1/15, en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/10. Scenario FL3 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/10, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/3.650.
- Voor scenario FL4 is neerslag ook maatgevend: de jaarlijkse kans op 10l/s/m overslag bedraagt 1/840 en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/100. Scenario FL4 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/100, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/36.500.

Kansen van voorkomen scenario's verkeerslast

Op het versterkte deel van strekking 3 is geen weg aanwezig. De dagelijkse kans op voorkomen van een verkeerslast van 5kPa is daarmee 1/365 (eens per jaar). Voor de overige kansen wordt verwezen naar paragraaf 4.3.

Resultaten en duiding

Uit de berekeningen van de conditionele faalkansen gegeven een combinatie van twee variabele belastingen volgt de 3D-fragility curve. Deze is in onderstaande tabel weergegeven. Na uitintegreren van de curve volgt een dagelijkse faalkans op doorsnedeniveau van $1,6E-12$, dit komt neer op een jaarlijkse faalkans van $5,9E-10$. Deze faalkans kan als verwaarloosbaar worden beschouwd. Dit lag ook in de lijn der verwachting, gezien het flauwe binnentalud dat in de dijkversterking is aangelegd.

3D-fragility curve	VB=1	VB=5	VB=13
FL2	4.05E-38	1.92E-36	1.14E-29
FL3	2.12E-30	1.69E-27	9.88E-18
FL4	1.10E-20	2.66E-14	1.02E-06

B.3.2 Niet versterkte deel

De schematisering uit de toetsing van 2015 is als basis gebruikt. Deze is op specifieke punten aangepast en geschikt gemaakt voor de voorbeelduitwerking conform de generieke uitgangspunten. Enkele specifieke uitgangspunten zijn hieronder beschreven.

Geometrie/dijkprofiel

De beschouwde doorsnede in deze paragraaf is sinds de toetsing van 2015 niet versterkt. Om met de meest recente informatie te rekenen, is een nieuw dwarsprofiel afgeleid op basis van AHN4.

Grondopbouw

In strekking 3, en ter plaatse van KR103_0168 is voldoende lokaal grondonderzoek beschikbaar. De originele ondergrondscenario's uit de toetsing komen daarmee te vervallen, en de ondergrond is geschematiseerd op basis van lokaal grondonderzoek. De ondergrond is als volgt geschematiseerd (dit komt overeen met het versterkte deel van strekking 3):

Van [m+NAP]	Tot [m+NAP]	Grondsoort
Maaiveld	-0,5	Klei
-0,5	-0,9	Veen
-0,9	-1,2	Klei
-1,2	-2,5	Veen
-2,5	-	Zand

Stijghoogte watervoerend pakket

De stijghoogte in het watervoerend pakket is gebaseerd op een beschikbare peilbuis uit DINO-loket, genaamd B15E0213-001. De stijghoogte is op basis van deze peilbuis ingeschat op een hoog-gemiddelde waarde van $1,50m+NAP$.

Kansen van voorkomen scenario's freatische lijn

De kansen van voorkomen van de scenario's voor de freatische lijn zijn voor de betreffende locatie als volgt:

- Scenario FL2 (jaarlijks maximum) heeft een jaarlijkse kans van voorkomen van 1, en een dagelijkse kans van voorkomen van $1/365$.
- Voor scenario FL3 is golfoverslag maatgevend: de jaarlijkse kans op $1l/s/m$ overslag bedraagt, op basis van de hoogteberekening bij KR103_0041 (hoogte strekking 6, niet versterkte deel), $1/1,5$, en is daarmee groter dan de jaarlijkse kans op neerslag van $1/10$. Scenario FL3 heeft

daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/1,5, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/75.

- Voor scenario FL4 is golfoverslag ook maatgevend: de jaarlijkse kans op 10l/s/m overslag bedraagt 1/30 en is daarmee groter dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/100. Scenario FL4 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/30, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/1.430.

Kansen van voorkomen scenario's verkeerslast

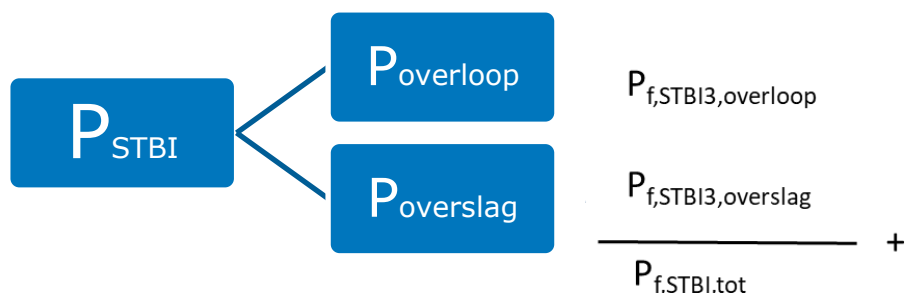
Op het niet versterkte deel van strekking 3 is een lokale weg aanwezig. Voor de dagelijkse kans op het voorkomen van een verkeerslast van 5kPa is daarmee 12/365 (maandelijks) aangenomen. Voor de overige kansen wordt verwezen naar paragraaf 4.3.

Resultaten en duiding

Uit de berekeningen van de conditionele faalkansen gegeven een combinatie van twee variabele belastingen volgt de 3D-fragility curve. Deze is in onderstaande tabel weergegeven. Na uitintegreren van de curve volgt een dagelijkse faalkans op doorsnedeniveau van 6,2E-07, dit komt neer op een jaarlijkse faalkans van 2,3E-04 (1/4.400).

3D-fragility curve	VB=1	VB=5	VB=13
FL2	3.00E-32	1.15E-27	2.09E-18
FL3	4.11E-17	2.24E-15	5.29E-08
FL4	1.34E-05	1.34E-05	4.41E-03

Vervolgens is onderzocht of de faalkans verder valt aan te scherpen, door het complete faalpad tot aan overstromen te beschrijven. Immers, de kans van 1/4.400 is de kans op een afschuiving die een groot deel van het dijklichaam aantast. Dit leidt echter niet per definitie tot een overstroming. Hieronder is het faalpad voor een overstroming als gevolg van een binnenwaartse afschuiving geïllustreerd. Voor een overstroming dient eerst een binnenwaartse afschuiving (P_{STBI}) op te treden, waarna er een restprofiel overblijft. Een overstroming treedt op wanneer dit restprofiel verder wordt aangetast door vervolgmecanismen. Relevante vervolgmecanismen voor strekking 3 zijn doorgaande erosie door ofwel door overloop ($P_{overloop}$) ofwel door golfoverslag ($P_{overslag}$).



In het faalpad is de kans op een afschuiving (P_{STBI}) gelijk aan het resultaat van de stabiliteitsanalyse: 1/4.400. In deze kans is scenario FL4 van de freatische lijn duidelijk bepalend. Zoals eerder uitgelegd, wordt dit scenario voor de betreffende doorsnede veroorzaakt door golfoverslag. Met andere woorden: een afschuiving wordt in grote mate veroorzaakt door golfoverslag. Kijkend naar onderstaand faalpad: als een afschuiving optreedt is al sprake van een overslagsituatie, de kans op vervolgmecanisme erosie door golfoverslag ($P_{overslag}$) is 1. De totale faalkans volgend uit het faalpad blijft daarmee 1/4.400; er is geen verdere aanscherping mogelijk binnen het faalpad.

B.4 Strekking 4

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 4. De maatgevende doorsnede van strekking 4 uit de toetsing van 2015 betreft KR103_0302. Deze locatie is zwart omcirkeld in onderstaande afbeelding. De schematisering uit de toetsing van 2015 is als basis gebruikt. Deze is op specifieke punten aangepast en geschikt gemaakt voor de voorbeelduitwerking conform de generieke uitgangspunten. Enkele specifieke uitgangspunten zijn hieronder beschreven.



Geometrie/dijkprofiel

De beschouwde doorsnede in deze paragraaf is sinds de toetsing van 2015 niet versterkt. Om met de meest recente informatie te rekenen, is toch een nieuw dwarsprofiel afgeleid op basis van AHN4. Hierbij is ook gecontroleerd of de locatie van KR103_0302 inderdaad de locatie is met het ongunstigste dijkprofiel; dit bleek het geval, waarmee deze schematisering juist is. De afmetingen van de teensloot zijn overgenomen uit de toetsing van 2015, met een slootbodem op -3m+NAP. AHN4 geeft namelijk geen redenen hiervan af te wijken.

Grondopbouw

In strekking 4 is geen lokaal grondonderzoek beschikbaar. Daarom is verondersteld dat de lokaal aanwezige ondergrond gelijk is aan het maatgevende scenario uit de toetsing, scenario 1D3. Voor het doel van deze pilot is deze veronderstelling/aanname voldoende. Bij een daadwerkelijke beoordeling verdient het aanbeveling extra grondonderzoek uit te voeren om een lokale grondopbouw te kunnen schematiseren.

Van [m+NAP]	Tot [m+NAP]	Grondsoort
Maaiveld	-1,3	Veen
-1,3	-1,6	Klei
-1,6	-3,5	Veen
-3,5	-	Zand

Stijghoogte watervoerend pakket

Voor de stijghoogte in het watervoerend pakket zijn geen geschikte peilbuismetingen beschikbaar in DINO-loket. Daarom is de stijghoogte overgenomen uit de toetsing van 2015, met een waarde van -1,50m+NAP

Kansen van voorkomen scenario's freatische lijn

De kansen van voorkomen van de scenario's voor de freatische lijn zijn voor de betreffende locatie als volgt:

- Scenario FL2 (jaarlijks maximum) heeft een jaarlijkse kans van voorkomen van 1, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/365.
- Voor scenario FL3 is neerslag maatgevend: de jaarlijkse kans op 1l/s/m overslag bedraagt, op basis van een hoogteberekening bij KR103_0396, 1/400, en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/10. Scenario FL3 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/10, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/3.650.
- Voor scenario FL4 is neerslag ook maatgevend: de jaarlijkse kans op 10l/s/m overslag bedraagt 1/126.000 en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/100. Scenario FL4 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/100, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/36.500.

Kansen van voorkomen scenario's verkeerslast

Op het versterkte deel van strekking 4 is geen weg aanwezig. De dagelijkse kans op voorkomen van een verkeerslast van 5kPa is daarmee 1/365 (eens per jaar). Voor de overige kansen wordt verwezen naar de algemene uitgangspunten.

Resultaten en duiding

Uit de berekeningen van de conditionele faalkansen gegeven een combinatie van twee variabele belastingen volgt de 3D-fragility curve. Deze is in onderstaande tabel weergegeven. Na uitintegreren van de curve volgt een dagelijkse faalkans op doorsnedeniveau van 4,3E-06, dit komt neer op een jaarlijkse faalkans van 1,6E-03 (1/635).

3D-fragility curve	VB=1	VB=5	VB=13
FL2	1.13E-08	1.71E-07	6.67E-05
FL3	8.59E-08	1.35E-06	4.78E-04
FL4	5.89E-07	1.17E-05	1.97E-03

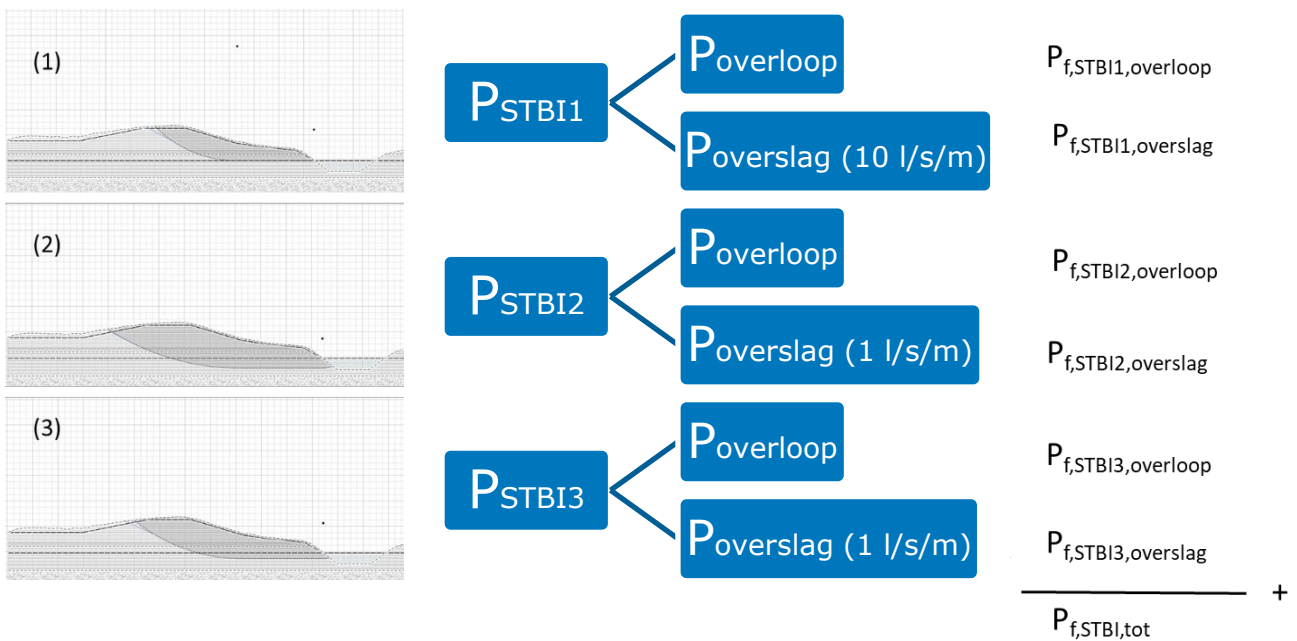
Vervolgens is onderzocht of de faalkans verder valt aan te scherpen, door het complete faalpad tot aan overstromen te beschrijven. In tegenstelling tot strekking 3 wordt een afschuiving in strekking 4 niet gedomineerd/veroorzaakt door golfoverslag (neerslag is immers maatgevend in de freatische lijn scenario's), waardoor het beschrijven van het gehele faalpad wel kansrijk is.

Onderstaande figuur toont de gehanteerde faalboom. Uitleg hierbij is als volgt:

- Onderstaande faalboom is beschouwd voor elk van de negen belastingcombinaties (3 verkeersbelasting- en 3 freatische lijn scenario's). Het resultaat van de faalboom is daarmee de overstromingskans gegeven de combinatie van freatische lijn en verkeerslast. Door deze kansen uit te integreren (over de kansverdelingen van deze belastingen) volgt de dagelijkse en jaarlijkse overstromingskans.
- Er zijn drie mogelijke vormen van een mogelijke (initiële) afschuiving beschouwd: een afschuiving door de kruin (1), een afschuiving waarbij vrijwel het gehele dijklichaam verdwijnt (2) en een afschuiving met intredepunt tussen 1 en 2 in (3). Voor elk van deze afschuivvormen is de kans op een afschuiving bepaald aan de hand van een probabilistische berekening.
- Na elk van de mogelijke afschuivingen (afschuivvormen) resteert een restprofiel. Dit restprofiel is per afschuivvorm bepaald met behulp van het TR Actuele sterkte bij dijken (of TRAS) (ENW, 2009).

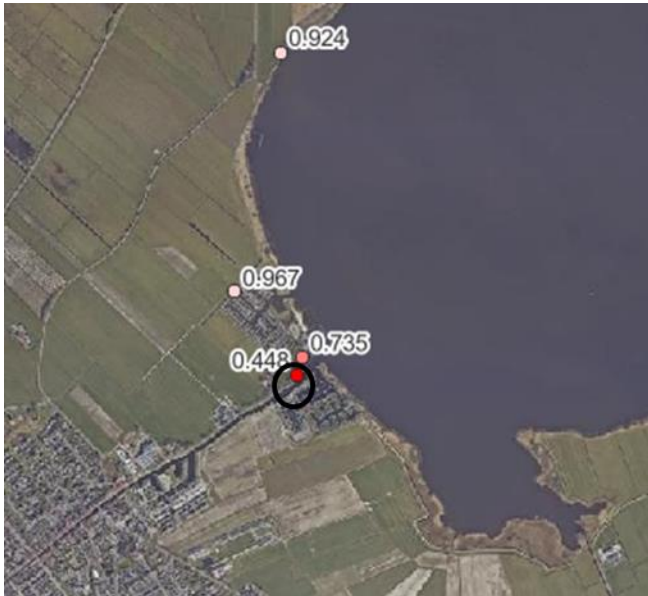
- Een overstroming treedt op als het restprofiel verder wordt aangetast als gevolg van overloop of golfoverslag. Verondersteld is dat bij afschuifvorm door de kruin (1) 10l/s/m overslag nodig is om tot doorgaande erosie te leiden (omdat nog een relatief groot restprofiel over is), bij de overige afschuifvormen (2) en (3) 1l/s/m overslag. De kansen op overloop en overslag zijn, gegeven de resterende hoogte van het restprofiel, bepaald met behulp van PROMOTOR. Aandachtspunt hierbij is dat deze vervolgmecanismen moeten optreden voordat de kering is hersteld na de initiële afschuiving; hierbij is een hersteltijd van 1 maand aangehouden.
- De totale kans voor een van de paden uit de faalboom volgt uit het product van de afzonderlijke knopen. Dit omdat de knopen als onafhankelijk kunnen worden beschouwd. Het blijkt namelijk dat het vervolgmecanisme overslag ruim maatgevend is boven overloop (de kans op overloop is zo klein, dat dit nauwelijks bijdraagt aan de totale faalkans). Overslag wordt voor de betreffende strekking veroorzaakt door een zware ZZW-storm (wind), terwijl een afschuiving wordt veroorzaakt door neerslag (en verkeerslast). Deze events kunnen als onafhankelijk worden beschouwd.
De totale kans voor een van de paden is dus gelijk aan het product van de knopen in het pad. De totale overstromingskans (gegeven een belastingcombinatie) is gelijk de som van de kansen op de verschillende paden, zoals weergegeven in onderstaande figuur.

Na uitvoeren van de faalpadanalyse, en opnieuw uitintegreren, volgt een overstromingskans voor strekking 4 van 1/200.000.



B.5 Strekking 5

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 5. De maatgevende doorsnede van strekking 5 uit de toetsing van 2015 betreft KR103_0347. Deze locatie is zwart omcirkeld in onderstaande afbeelding. De schematisering uit de toetsing van 2015 is als basis gebruikt. Deze is op specifieke punten aangepast en geschikt gemaakt voor de voorbeelduitwerking conform de generieke uitgangspunten. Enkele specifieke uitgangspunten zijn hieronder beschreven.



Geometrie/dijkprofiel

De beschouwde doorsnede in deze paragraaf is sinds de toetsing van 2015 niet versterkt. Om met de meest recente informatie te rekenen, is toch een nieuw dwarsprofiel afgeleid op basis van AHN4. Hierbij is ook gecontroleerd of de locatie van KR103_0347 inderdaad de locatie is met het ongunstigste dijkprofiel; dit bleek het geval, waarmee deze schematisering juist is.

Op basis van AHN4 (met name de taluds van de sloot) is de bodem van de teensloot geschematiseerd op $-1,5\text{m}+\text{NAP}$. Hiermee is afgeweken van de toetsing van 2015, waar de slootbodem op $-2,2\text{m}+\text{NAP}$ ligt.

Grondopbouw

In strekking 5 is geen lokaal grondonderzoek beschikbaar. Daarom is verondersteld dat de lokaal aanwezige ondergrond gelijk is aan het maatgevende scenario uit de toetsing, scenario 1D3. Voor het doel van deze pilot is deze veronderstelling/aanname voldoende. Bij een daadwerkelijke beoordeling verdient het aanbeveling extra grondonderzoek uit te voeren om een lokale grondopbouw te kunnen schematiseren.

Van [m+NAP]	Tot [m+NAP]	Grondsoort
Maaiveld	-0,5	Veen
-0,5	-0,8	Klei
-0,8	-1,7	Veen
-1,7	-	Zand

Stijghoogte watervoerend pakket

De stijghoogte is overgenomen uit de toetsing van 2015, met een waarde van -1,0m+NAP. Dit komt overeen met beschikbare peilbuismetingen in DINO-loket.

Kansen van voorkomen scenario's freatische lijn

De kansen van voorkomen van de scenario's voor de freatische lijn zijn voor de betreffende locatie als volgt:

- Scenario FL2 (jaarlijks maximum) heeft een jaarlijkse kans van voorkomen van 1, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/365.
- Voor scenario FL3 is neerslag maatgevend: de jaarlijkse kans op 1l/s/m overslag bedraagt, op basis van een hoogteberekening bij KR103_0348, 1/300.000, en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/10. Scenario FL3 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/10, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/3.650.
- Voor scenario FL4 is neerslag ook maatgevend: de jaarlijkse kans op 10l/s/m overslag bedraagt 1/300.000 en is daarmee kleiner dan de jaarlijkse kans op neerslag van 1/100. Scenario FL4 heeft daarmee een jaarlijkse kans van voorkomen van 1/100, en een dagelijkse kans van voorkomen van 1/36.500.

Kansen van voorkomen scenario's verkeerslast

Op het versterkte deel van strekking 5 ligt een grote weg, waar zwaar verkeer overheen kan. De dagelijkse kans op voorkomen van een verkeerslast van 5kPa is daarmee 1 (eens per dag). Voor de overige kansen wordt verwezen naar paragraaf 4.3.

Resultaten en duiding

Uit de berekeningen van de conditionele faalkansen gegeven een combinatie van twee variabele belastingen volgt de 3D-fragility curve. Deze is in onderstaande tabel weergegeven. Na uitintegreren van de curve volgt een dagelijkse faalkans op doorsnedeniveau van 2,9E-04, dit komt neer op een jaarlijkse faalkans van 1,0E-01 (1/10).

3D-fragility curve	VB=1	VB=5	VB=13
FL2	2.07E-09	3.76E-08	5.29E-04
FL3	2.37E-07	1.88E-06	3.40E-03
FL4	1.19E-02	1.38E-02	1.55E-01

Net als voor strekking 3 (het niet versterkte deel) en 4 is onderzocht of deze faalkans verder is aan te scherpen, door het complete faalpad tot aan een overstroming te beschrijven. Onderstaande afbeelding toont een schematische weergave van de strekking: een relatief kleine dijk kruin met daarvoor een breed en hoog voorland.



Overwegingen bij het faalpad en de overstromingskans volgen hieronder:

- Na een binnenwaartse afschuiving (zie figuur hierboven) blijft het voorland over, dat minimaal op een hoogte van 0,1m+NAP ligt.
- De strekking ligt beschermd van golven, dit volgt ook uit hoogteberekeningen (overloop maatgevend). Een overstroming treedt pas op als naast de afschuiving, ook een waterstand hoger dan voorlandniveau ($h > 0,1\text{m}+\text{NAP}$) optreedt.
- De kans op een afschuiving bedraagt 1/10 (jaarlijks), zoals hierboven bepaald. De kans op een waterstand hoger dan 0,1l/s/m is bepaald met PROMOTOR en bedraagt 1/15.100.
- Een binnenwaartse afschuiving wordt in grote mate veroorzaakt door neerslag. Een hoge waterstand op het Slotermeer wordt ook deels veroorzaakt door neerslag. Het optreden van een afschuiving en een hoge waterstand zijn dus in enige mate gecorreleerd.
- Een conservatieve schatting voor het optreden van beide events (parallel systeem), en daarmee de overstromingskans, gaat uit van volledige correlatie, en bedraagt de minimale kans van de afzonderlijke events: 1/15.100.
- Wanneer bovenstaande sequentieel wordt beschouwd, betekent dit dat voor een overstroming een hoge waterstand (hoger dan 1m+NAP) nodig is (met kans 1/15.100), gevolgd door een afschuiving. In bovenstaande conservatieve schatting van de overstromingskans is de conditionele kans op een afschuiving gegeven een waterstand hoger dan voorland gelijk aan 1. Uit de D-Stability berekeningen blijkt echter dat de hoogst berekende conditionele kans (gegeven een verzadigde dijk en een verkeerslast van 13kPa) 1/6 bedraagt. De overstromingskans is daarom aangescherpt, tot het product van de kansen 1/15.100 en 1/6, en bedraagt 1/90.600.

B.6 Strekking 6

Onderstaande afbeelding toont de ligging van strekking 6. De maatgevende doorsnede van strekking 6 uit de toetsing van 2015 betreft KR103_0288. Deze locatie is zwart omcirkeld in onderstaande afbeelding. Een groot deel van strekking 6 is hoge grond, waarbij het achterland op een hoger niveau ligt dan de omringende polders (rood omcirkeld). Dit is ook zichtbaar in het hoogtepfiel op basis van AHN3 in Figuur 3-2. De maatgevende doorsnede van de strekking bevindt zich overigens niet in dit deel maar langs de boezem met een 'polderdijk' (zie Figuur 7-1).



In de inventarisatie van de ondergrondgegevens blijkt dat de bijdrage van het ondergrondscenario met een stabiliteitsfactor van 0.626 maar 3% bijdrage heeft. Het ondergrondscenario welke leidt tot een hogere stabiliteitsfactor (1D2) heeft een 95% bijdrage. Het verschil tussen de verschillende scenario's is de dikte van de slappe lagen onder de dijk kern. Vanuit de ondergrondgegevens blijkt de slappe laag tot 1,5 à 2,0m onder NAP te gaan. Dit is minder diep dan het maatgevende scenario (1D3). Daarom is de verwachting dat met het toepassen van een lokale ondergrond schematisatie het ondergrondscenario met 95% kans representatief is. De bijbehorende stabiliteitsfactor is een stuk hoger en daarom wordt verondersteld dat deze locatie niet bijdraagt aan de trajectkans.

KR103_0288

Stabiliteitsfactor [-]	Ondergrondscenario	Kans op ondergrondscenario
0.898	segment_277_1D1	0.02
0.909	segment_277_1D2	0.95
0.626	segment_277_1D3	0.03

C Piping

Voor de bepaling van de faalkans op piping zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd in de voorbeelduitwerking:

Voor de zandlagen die voorkomen in KR103 is geen lokaal grondonderzoek aanwezig dat kan worden gebruikt om de d_{70} te bepalen. De d_{70} is daarom ingeschat op basis van default waarden. De schematiseringshandleiding piping bij kunstwerken (WBI 2017b) bevat tabellen met bandbreedtes in mediane korreldiameter die horen bij een bepaalde grondsoort (bijvoorbeeld zeer fijn zand, matig grof zand, etc.). Op basis van de boorbeschrijvingen is per strekking de grond-/zandsoort bepaald, welke is gekoppeld aan de bijbehorende bandbreedte van de mediane korreldiameter. De d_{70} is vervolgens gelijkgesteld aan de gemiddelde waarde van deze bandbreedte. Dit is een veilige keuze, aangezien de d_{70} doorgaans iets groter zal zijn dan de mediane korreldiameter. De verwachtingswaardes voor de d_{70} van de verschillende grond-/zandsoorten zijn opgenomen in onderstaande tabel. Als variatiecoëfficiënt is een waarde van 0,12 gehanteerd, op basis van de schematiseringshandleiding piping (WBI 2017a).

Grondsoort	d_{70} (μm)
Zand - zeer fijn	128
Zand - matig fijn	180
Zand - matig grof	255
Grind	2.000

Verder zijn een aantal algemene piping stochasten en waarden hetzelfde voor elke doorsnede. Deze zijn in onderstaande tabel opgenomen en zijn overgenomen van default waarden uit Riskeer of overgenomen uit de rapportage betreffende de afleiding van de semi-probabilistische piping regel (WTI 2017).

Parameter	Verdeling	Gemiddelde	Standaard-deviatie	Bron
White's weerstandcoëfficiënt [-]	Lognormaal	0,25	0,001	WTI 2017
Kritieke heavegradiënt [-]	Lognormaal	0,5	0,1	WTI 2017
Modelfactor piping [-]	Normaal	1	0,12	WTI 2017
Modelfactor uplift [-]	Normaal	1	0,1	WTI 2017
Rolweerstandshoek [graden]	Deterministisch	37	-	Riskeer
70e kwantiel waarde korrelgrootte [m]	Deterministisch	2,08E-04	-	Riskeer
Reductiefactor [-]	Deterministisch	0,3	-	Riskeer
Kinematische viscositeit [m^2/s]	Deterministisch	1,33E-06	-	Riskeer
Volumieke dichtheid zand onder water [kN/m^3]	Deterministisch	16,19	-	Riskeer

c.1 Strekking A

Strekking A ligt in het zuidwesten van de kadering langs het Fluessen meer en bevat één doorsnede die een veiligheidsfactor van onder de 1,2 heeft. Deze doorsnede is KR103_0054 en is zal als enige bijdragen aan de faalkans van piping voor strekking A.

C.1.1 Analyse

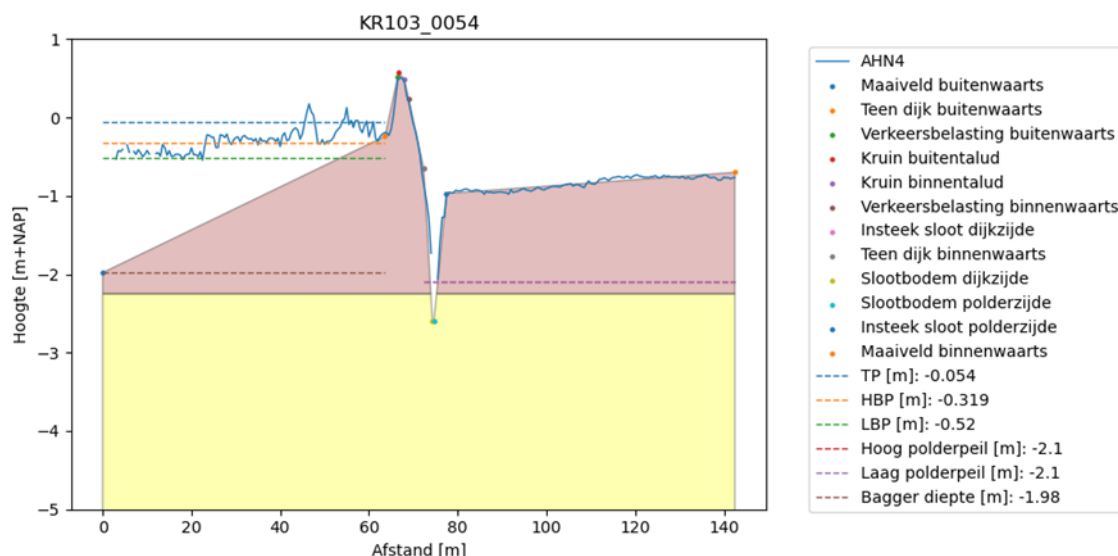
Met behulp van de kenmerkende profielpunten en een combinatie van REGIS II (watervoerende lagen) en GEOTop (deklaag) is een dwarsdoorsnede per profiel gemaakt, zie onderstaande figuur. In de toetsing is de dijk als een veendijk geschematiseerd, dit is overgenomen in deze analyse. Met behulp van dit profiel en luchtfoto's zijn de volgende geometrische kenmerken bepaald:

- Het uittredepunt ligt in de teensloot;
- De kwelweglengte (zonder intredeweerstand) is met behulp van luchtfoto's bepaald en ingeschat op 24 meter. Deze 24 meter worden gebruikt als gemiddelde voor de stochast met een standaarddeviatie van 5%;
- Hoog polderpeil is -2,1 meter. Dit is overgenomen als stochast met een minimale onzekerheid (standaard deviatie 1cm);
- De responsfactor is aangenomen op 0,99 met een minimale onzekerheid van 0,001 (praktisch gezien 1);
- De dikte van de deklaag ter plaatse van het uittredepunt is als nagenoeg 0m ingeschat.

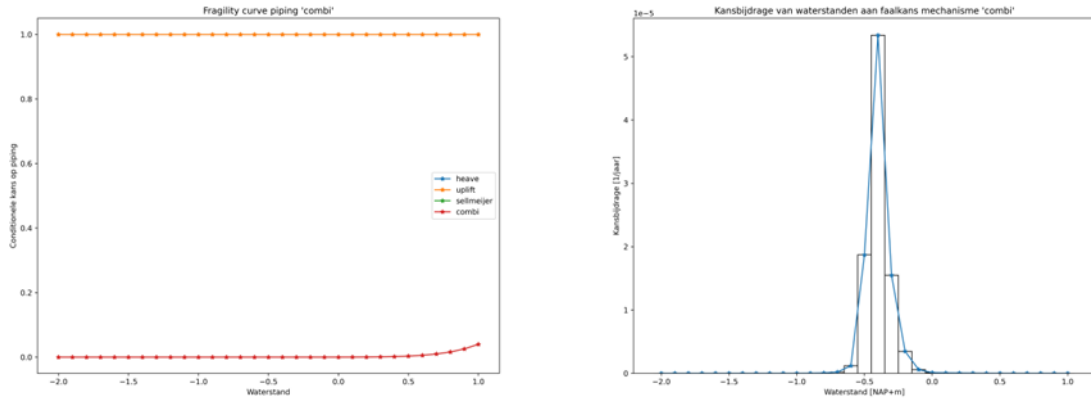
Op basis van REGIS II zijn ter plaatse van profiel KR103_0054 de eigenschappen van het watervoerende pakket ingeschat:

- De dikte van het watervoerende pakket is ingeschat op 12-16 meter . Dit is gebruikt om een stochast te maken met gemiddelde 14m en standaarddeviatie 1m.
- De horizontale doorlatendheid is 2,5-5m/dag. Dit is gebruikt om een stochast te maken met gemiddeld 3,75m/dag en standaarddeviatie 0,625m/dag.

Op basis van lokale boringen is de beschrijving van het zand in het watervoerende pakket 'matig fijn'. Conform de aannames die beschreven staan in het begin van deze bijlage is de bijbehorende d_{70} 180 μ m. De volumieke gewichten van de materialen zijn overgenomen uit macrostabiliteit (Bijlage B).



Onderstaande afbeeldingen tonen links de fragility curves voor de deelfaalmechanismen en de gecombineerde fragility curve en rechts, na combinatie met de waterstandoverschrijdingsfrequentielijn, de kansbijdrages per waterstand.



C.1.2 Duiding

Uit de fragility curves volgt dat, omdat alle drie de deelmechanismes moeten optreden voordat falen kan optreden de Sellmeijer curve de laagste kansen heeft en daarmee de gecombineerde piping kans bepaalt. De uitgeïntegreerde jaarlijkse faalkans is 1/10.700. Uit de kansbijdrages volgt dat de grootste massa rond de -0,4m NAP ligt, wat rond hoog boezempeil ligt. Deze waterstand komt relatief vaak voor en omdat de combi fragility curve relatief vlak loopt, volgt hier logischerwijs uit dat de grootste kansbijdrage rond deze waterstand zit. De combi curve neemt weliswaar toe bij hoge waterstanden, maar deze zijn zo zeldzaam dat deze niet resulteren in een significante kansbijdrage.

c.2 Strekking B

Strekking B ligt in het noordoosten van de kadering langs het Fluessen meer en bevat twee doorsnedes die een veiligheidsfactor van onder de 1,2 hebben. Deze doorsnedes zijn KR103_0203 en KR103_0205 en zullen als enige bijdragen aan de faalkans van piping voor strekking B.

C.2.1 Analyse

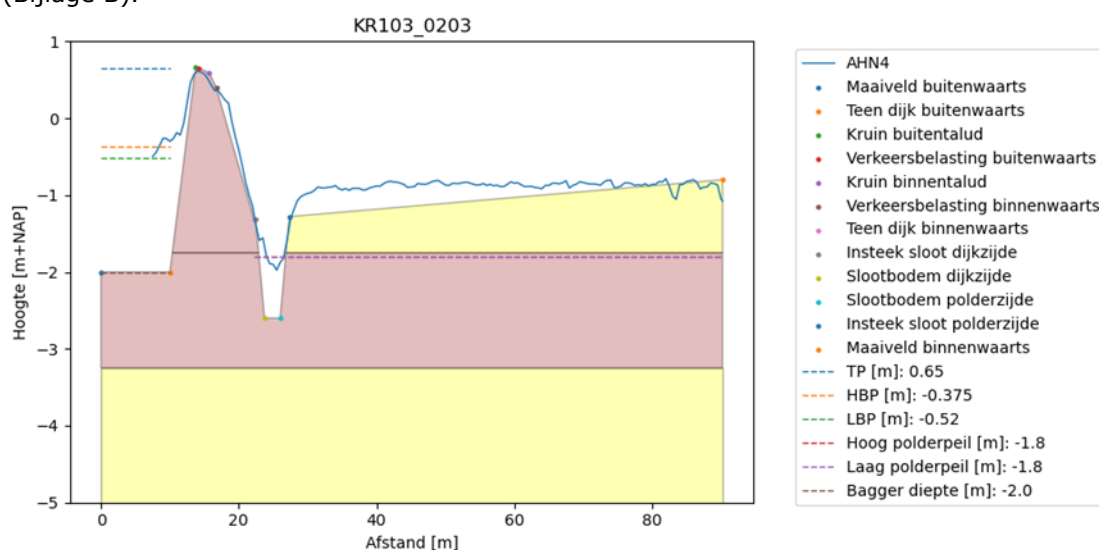
Met behulp van de kenmerkende profielpunten en een combinatie van REGIS II (watervoerende lagen) en GEOTop (deklaag) is een dwarsdoorsnede per profiel gemaakt, zie onderstaande figuur. In de toetsing is de dijk als een veendijk geschematiseerd, dit is overgenomen in deze analyse. Met behulp van dit profiel en luchtfoto's zijn de volgende geometrische kenmerken bepaald:

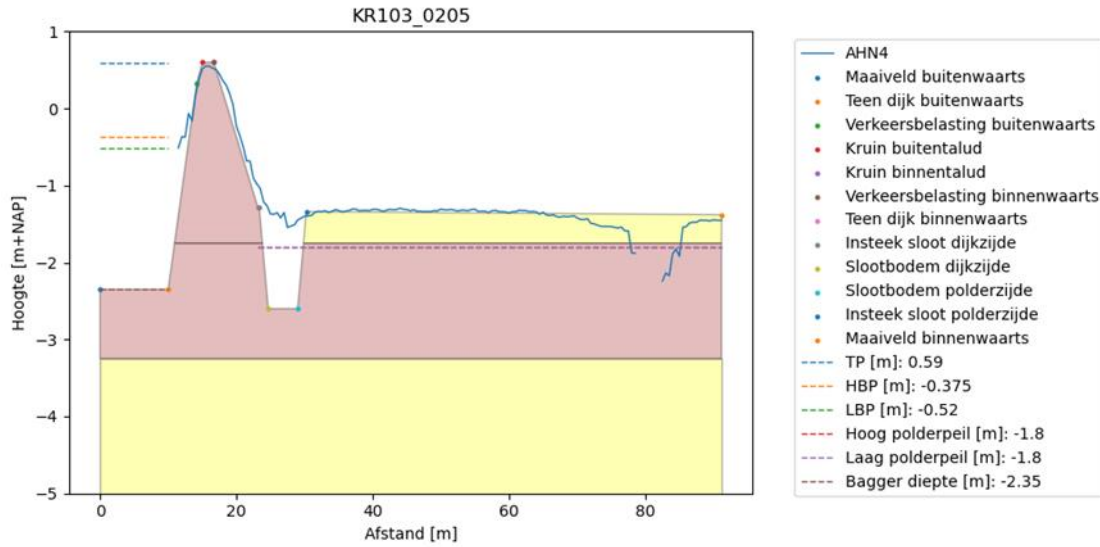
- Het uittredepunt ligt voor beide profielen in de teensloot;
- De kwelweglengte (zonder intredeweerstand) is van buitenteen – teensloot ingeschat op 15 meter voor profiel 203 en 17 meter voor profiel 205. Deze waarden worden gebruikt als gemiddelde voor de stochast kwelweglengte met een standaarddeviatie van 5%;
- Hoog polderpeil is voor beide profielen -1,8 meter. Dit is overgenomen als stochast met een minimale onzekerheid (standaard deviatie 1cm);
- De responsfactor is aangenomen op 0,99 met een minimale onzekerheid van 0,001 (praktisch gezien 1);
- De dikte van de deklaag ter plaatse van het uittredepunt is voor beide profielen op 0,5 meter ingeschat met een standaarddeviatie van 0,1 meter.

Op basis van REGIS II zijn ter plaatse van de twee profielen de eigenschappen van het watervoerende pakket ingeschat:

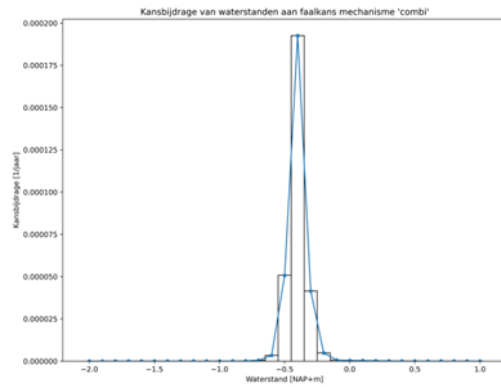
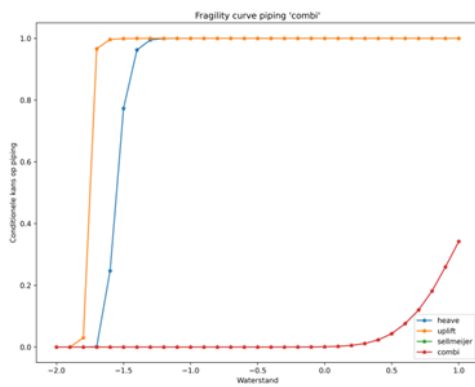
- De dikte van het watervoerende pakket is voor beide profielen ingeschat op 7-8 meter . Dit is gebruikt om een stochast te maken met gemiddelde 7,5m en standaarddeviatie 0,25m.
- De horizontale doorlatendheid is 5-10m/dag. Dit is gebruikt om een stochast te maken met gemiddeld 7,5m/dag en standaarddeviatie 1,25m/dag.

Op basis van lokale boringen is de beschrijving van het zand in het watervoerende pakket 'matig fijn'. Conform de aannames die beschreven staan in het begin van deze bijlage is de bijbehorende d_{70} 180 μ m. De volumieke gewichten van de materialen zijn overgenomen uit macrostabiliteit (Bijlage B).

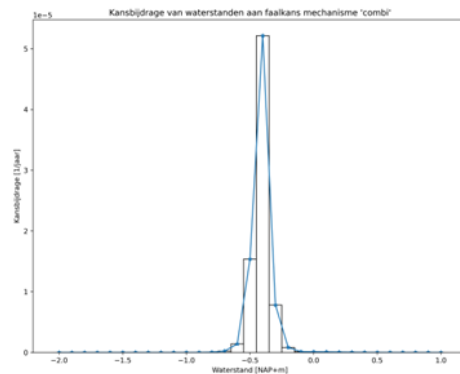
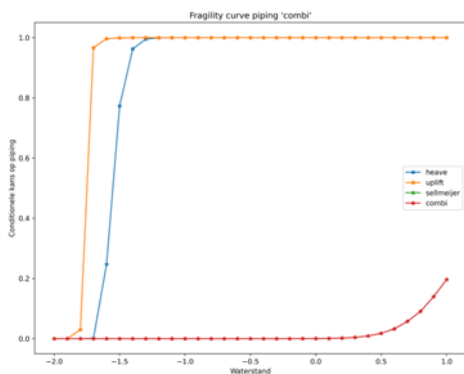




Onderstaande afbeeldingen tonen voor profiel 203 links de fragility curves voor de deelfaalmecanismen en de gecombineerde fragility curve en rechts, na combinatie met de waterstandoverschrijdings-frequentielijn, de kansbijdrages per waterstand.



Onderstaande afbeeldingen tonen voor profiel 205 links de fragility curves voor de deelfaalmecanismen en de gecombineerde fragility curve en rechts, na combinatie met de waterstandoverschrijdingsfrequentielijn, de kansbijdrages per waterstand.



C.2.2 Duiding

Uit de fragility curves voor beide profielen volgt dat, omdat alle drie de deelmechanismes moeten optreden voordat falen kan optreden de Sellmeijer curve de laagste kansen heeft en daarmee de gecombineerde piping kans bepaalt. De uitgeïntegreerde jaarlijkse faalkans voor profiel 203 is $1/3.400$ en voor profiel 205 $1/12.800$. Uit de kansbijdrages volgt dat de grootste massa rond de -0,4m NAP ligt, wat rond hoog boezempeil ligt. Deze waterstand komt relatief vaak voor en omdat de combi fragility curve relatief vlak loopt, volgt hier logischerwijs uit dat de grootste kansbijdrage rond deze waterstand zit. De combi curve neemt weliswaar toe bij hoge waterstanden, maar deze zijn zo zeldzaam dat deze niet resulteren in een significante kansbijdrage.

c.3 Strekking C

Strekking C ligt in het oosten van de kadering langs het Slotermeer en bevat twee doorsnedes die een veiligheidsfactor van onder de 1,2 hebben. Deze doorsnedes zijn KR103_0342 en KR103_0347 en zullen als enige bijdragen aan de faalkans van piping voor strekking C.

C.3.1 Analyse

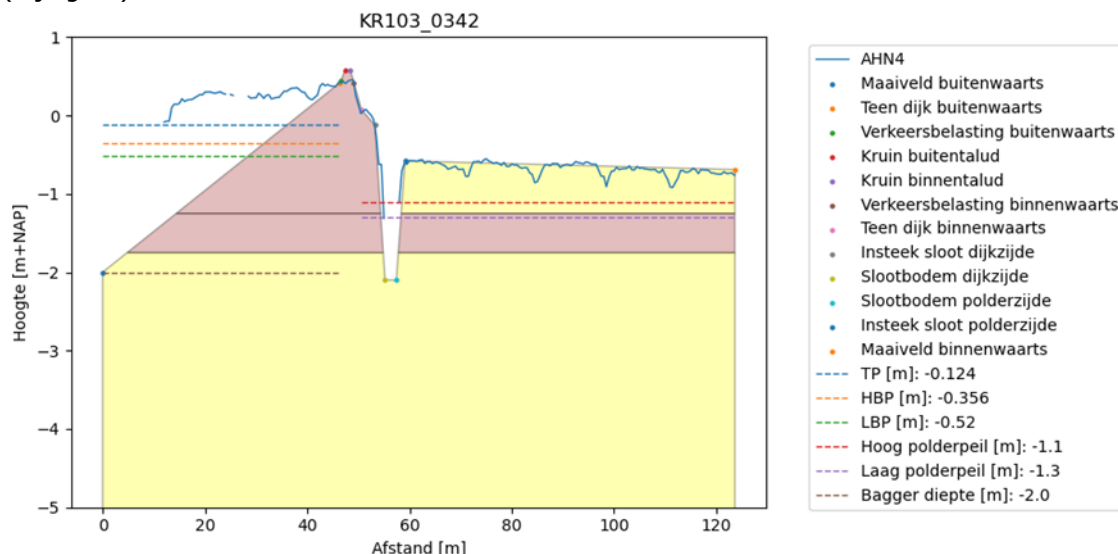
Met behulp van de kenmerkende profielpunten en een combinatie van REGIS II (watervoerende lagen) en GEOTop (deklaag) is een dwarsdoorsnede per profiel gemaakt, zie onderstaande figuur. In de toetsing is de dijk als een veendijk geschematiseerd, dit is overgenomen in deze analyse. Met behulp van dit profiel en luchtfoto's zijn de volgende geometrische kenmerken bepaald:

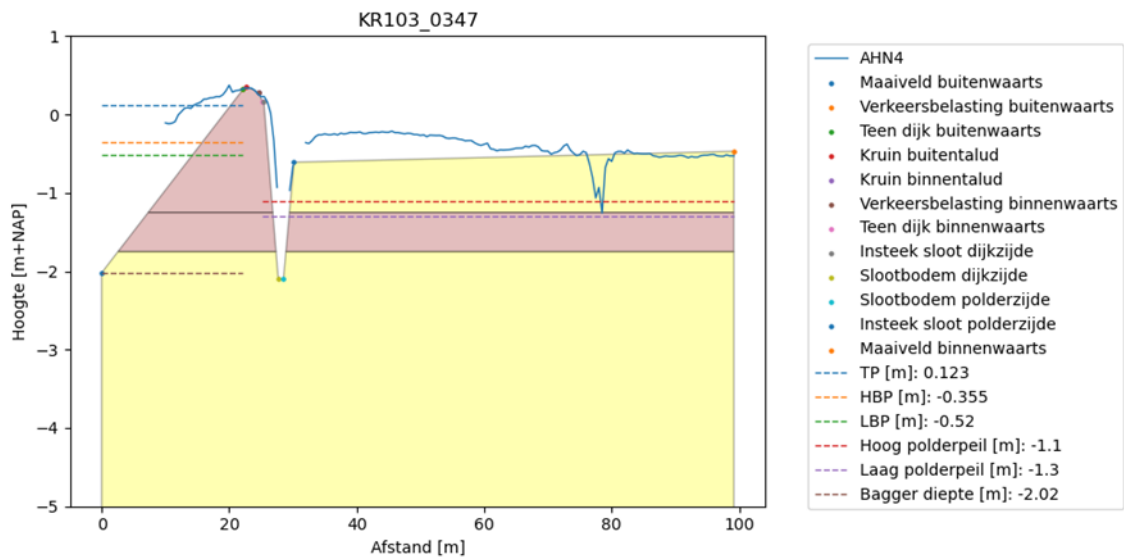
- Het uittredepunt ligt voor beide profielen in de teensloot;
- De kwelweglengte (zonder intredeweerstand) is met behulp van luchtfoto's bepaald en ingeschat op 23 meter voor profiel 342 en 16 meter voor profiel 347. Deze waarden worden gebruikt als gemiddelde voor de stochast kwelweglengte met een standaarddeviatie van 5%;
- Hoog polderpeil is voor beide profielen -1,1 meter. Dit is overgenomen als stochast met een minimale onzekerheid (standaard deviatie 1cm);
- De responsfactor is aangenomen op 0,99 met een minimale onzekerheid van 0,001 (praktisch gezien 1);
- De dikte van de deklaag ter plaatse van het uittredepunt is voor beide profielen als nagenoeg 0m ingeschat.

Op basis van REGIS II zijn ter plaatse van de twee profielen de eigenschappen van het watervoerende pakket ingeschat:

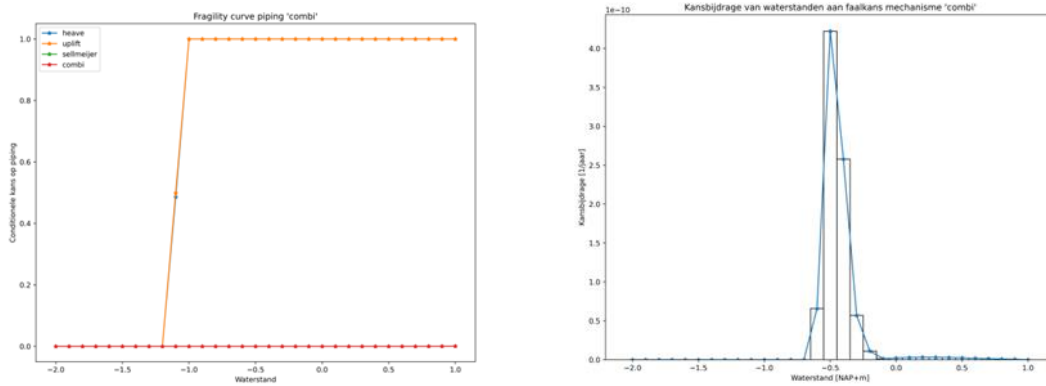
- De dikte van het watervoerende pakket is voor beide profielen ingeschat op 5-9 meter. Dit is gebruikt om een stochast te maken met gemiddelde 7m en standaarddeviatie 1m.
- De horizontale doorlatendheid is 5-10m/dag. Dit is gebruikt om een stochast te maken met gemiddeld 7,5m/dag en standaarddeviatie 1,25m/dag.

Op basis van lokale boringen is de beschrijving van het zand in het watervoerende pakket 'matig fijn'. Conform de aannames die beschreven staan in het begin van deze bijlage is de bijbehorende d_{70} 180 μ m. De volumieke gewichten van de materialen zijn overgenomen uit macrostabiliteit (Bijlage B).

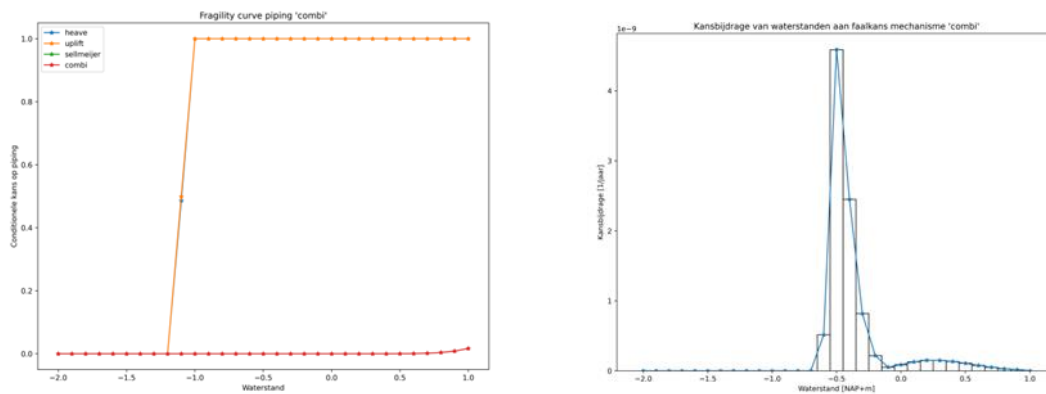




Onderstaande afbeeldingen tonen voor profiel 342 links de fragility curves voor de deelfaalmecanismen en de gecombineerde fragility curve en rechts, na combinatie met de waterstandoverschrijdingsfrequentielijn, de kansbijdrages per waterstand.



Onderstaande afbeeldingen tonen voor profiel 347 links de fragility curves voor de deelfaalmecanismen en de gecombineerde fragility curve en rechts, na combinatie met de waterstandoverschrijdingsfrequentielijn, de kansbijdrages per waterstand.



C.3.2 Duiding

Uit de fragility curves voor beide profielen volgt dat, omdat alle drie de deelmechanismes moeten optreden voordat falen kan optreden de Sellmeijer curve de laagste kansen heeft en daarmee de gecombineerde piping kans bepaalt. De uitgeïntegreerde jaarlijkse faalkans voor profiel 342 is $1/1,20E9$ en voor profiel 347 $1/1,04E8$. Uit de kansbijdrages volgt dat de grootste massa rond de -0,4m NAP ligt, wat rond hoog boezempeil ligt. Deze waterstand komt relatief vaak voor en omdat de combi fragility curve relatief vlak loopt, volgt hier logischerwijs uit dat de grootste kansbijdrage rond deze waterstand zit. De combi curve neemt weliswaar toe bij hoge waterstanden, maar deze zijn zo zeldzaam dat deze niet resulteren in een significante kansbijdrage.

Veiligheids- benadering regionale keringen

Integrale conclusies pilots

Opdrachtgever



STOWA



Veiligheids- benadering regionale keringen



Integrale conclusies pilots

Eindrapport

Auteur(s)

Mick van Montfoort
Bas Kolen

PR4503.10

Juni 2023

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Onderwerpen pilots	2
1.3	Doel rapportage	3
2	Gevolgenbepaling	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Inzichten en conclusies	5
3	Systeemmaatregelen	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Inzichten en conclusies	9
4	Bepalen overstromingskans	11
4.1	Inleiding	11
4.2	Inzichten en conclusies	11
5	MKBA	14
5.1	Inleiding	14
5.2	Inzichten en conclusies	14
6	Referenties	17

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Nederlandse waterkeringsstelsel bestaat onder andere uit primaire, regionale en overige keringen. Voor de primaire waterkeringen is recent (2017) overgestapt van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering per dijktraject. Voor regionale keringen wordt momenteel uitgegaan van een overschrijdingskansbenadering. Voor de regionale keringen is verkend op welke wijze de vigerende veiligheidsbenadering kan worden aangepast. Op basis van die verkenning is geconcludeerd dat een regionale benadering wenselijk is, die recht doet aan de verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen. Ten behoeve van de invulling van de specifieke regionale benadering zijn vier pilots uitgevoerd, waarin een top 4 met denkbare aanpassingen zijn uitgetoet. Voor een goed landelijk beeld zijn hiervoor 2 typen regionale keringen beschouwd, en 2 typen beschermde gebieden. Aldus resulteren 4 pilots, te weten:

- Boezemkade – landelijk: een kade langs een boezem die een landelijk gebied beschermt;
- Boezemkade – stedelijk: een kade langs een boezem die een stedelijk gebied beschermt;
- Regionale rivier – landelijk: een kering langs een regionale rivier die een landelijk gebied beschermt;
- Regionale rivier – stedelijk: een kering langs een regionale rivier die een stedelijk gebied beschermt.

Onderzoeksvragen

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de aanpassing van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. Daartoe zijn de volgende denkbare aanpassingen onderzocht:

- normeren:
 - o uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming, zowel binnen als buiten het overstroomde gebied;
 - o rekening houden met maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
 - o medegebruik: kan medegebruik maatgevende eisen stellen aan de kering die moeten worden meegewogen bij de normstelling van de kering uit oogpunt waterveiligheid;
 - o de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses);
- toetsen:
 - o werkwijzen voor de toetsing.

Afhankelijk van de aard van de pilot zijn binnen de uitwerking de accenten op verschillende onderdelen gelegd. Zo is in één pilot veel aandacht besteed aan het rekening houden met slachtoffers, terwijl in een andere bijvoorbeeld de meerwaarde van een gedifferentieerde (per faalmechanisme) normering. Ook zijn de wijzen waarop is geverifieerd op de sterkte van de kering aan de norm voldoet op verschillende wijzen uitgewerkt, teneinde de bruikbaarheid van enkele (internationale) werkwijzen voor zo'n verificatie te verkennen. Hoewel de pilots dus generiek van opzet zijn, verschillen het detailniveau waarin de onderzoeksvragen zijn uitgewerkt.

Disclaimer

Voor de uitwerking van de pilots is gebruik gemaakt van werkelijke dijkvakken en beschermde gebieden. Het doel van de pilots is de toegevoegde waarde, de haalbaarheid en de consequentie van verschillende aanpassingen van de toets- en normeringsmethodes te onderzoeken. Het verkrijgen van een gedetailleerd en accuraat beeld van de actuele waterveiligheid in de pilotgebieden was nadrukkelijk niet het doel. Uit oogpunt van doelmatigheid van de uitwerking zijn uitgangspunten soms vereenvoudigd of zijn (soms grove) aannamen gedaan, daar waar dat acceptabel was uit oogpunt van de doelstelling van de pilots. Daarmee hebben de resultaten zoals de optimale normen en het aangetoonde veiligheidsniveau geen betekenis voor de beschouwde pilotgebied. Benadrukt wordt daarom dat geen van de conclusies uit dit rapport gebruikt kunnen worden om conclusies aan te verbinden over de beschouwde pilotgebieden.

Deze rapportage beschrijft de belangrijkste conclusies en inzichten die zijn opgedaan in de vier pilots, en vormt daarmee een belangrijke basis voor de besluitvorming over de veiligheidsbenadering. De rapportage vormt een onderdeel van een aantal rapporten die in het kader van deze verkenning zijn uitgebracht. Zie Tabel 1-1.

Tabel 1-1: Rapportages verkenning veiligheidsbenadering

Titel	Auteur
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Boezemkade – stedelijk	M. van Montfoort (HKV)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Regionale rivier – landelijk	M. Kampen & M. Stam (Sweco)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Regionale rivier – stedelijk	M. Monden & D. Wubben (IV-Infra), B. Bouman & N. van dijk (TAUW)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Boezemkade – landelijk	G. van Rinsum (Witteveen+Bos)
Integrale conclusies pilots	M. van Montfoort (HKV)
Bouwstenenrapport	M. van Montfoort (HKV)
Consequentie analyse	E. van der Heijden (STOWA)
Impactanalyse overstromingskansbenadering	J. Caspers & G. Dupuit (HKV)

1.2 Onderwerpen pilots

In de pilots zijn de volgende onderwerpen met betrekking tot de veiligheidsbenadering uitgewerkt:

- Gevolgenbepaling: het in kaart brengen en kwantificeren van de gevolgen van een kering doorbraak;
- Watersysteemmaatregelen: ingrepen aan het watersysteem die de gevolgen van een doorbraak reduceren;
- Bepalen overstromingskans: het bepalen/berekenen van de overstromingskans, ter verificatie of aan een gestelde norm wordt voldaan;
- Kosten-baten analyse (MKBA): het bepalen van de economisch optimale overstromingskans.

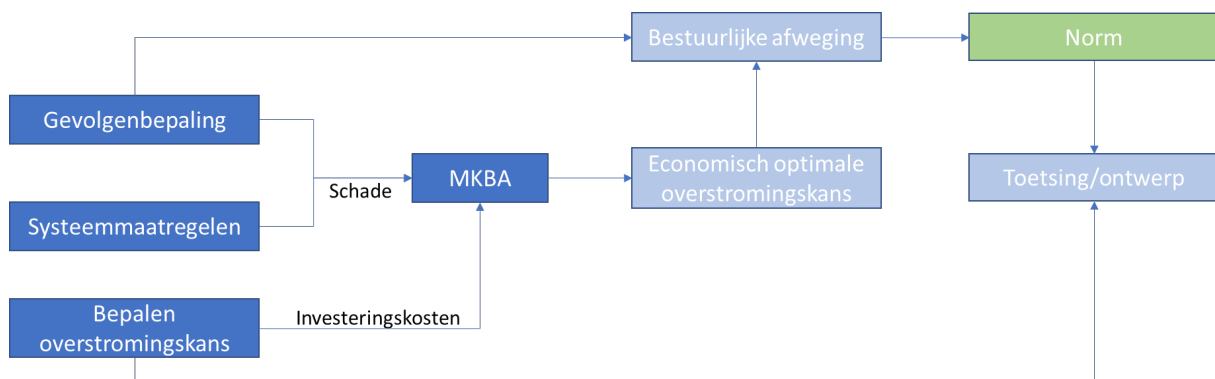
Aanvullend is voor enkele pilots een extra onderwerp uitgewerkt:

- Nevenfuncties: beschouwen in hoeverre eisen aan nevenfuncties van de waterkering (bijvoorbeeld de verkeersfunctie) maatgevend (kunnen) zijn boven de waterveiligheidseisen.

Dit onderwerp komt in voorliggende rapportage niet verder aan bod, omdat het niet doorslaggevend is voor de besluitvorming over de veiligheidsbenadering. Aanbevolen wordt om in een toekomstig ontwerp expliciet te beschouwen welke eisen aan medegebruik heersen, en deze mee te nemen in het ontwerp. Voor meer informatie, zie de pilotrapportages 'Regionale rivier - stedelijk' en 'Boezemkade - landelijk' (zie Tabel 1-1)

Figuur 1-1 illustreert welke rol bovenstaande onderwerpen (m.u.v. de nevenfuncties) spelen binnen de veiligheidsbenadering. De gevolgenbepaling en systeemmaatregelen bepalen samen het totale schadebedrag als gevolg van een overstroming. Het onderwerp 'bepalen overstromingskans' geeft een beeld van de omvang van maatregelen die nodig zijn om de kering te versterken tot aan een bepaalde norm, en van de bijbehorende investeringskosten. De gevolgschade en de investeringskosten dienen als input in een MKBA, waarmee de economisch optimale overstromingskans kan worden bepaald. Het vaststellen van de norm is uiteindelijk een bestuurlijke afweging. Vaak dient de economisch optimale overstromingskans hiervoor als basis, aangevuld met mogelijke overige overwegingen (bijvoorbeeld gevolgen van een overstroming die bestuurlijk gevoelig liggen en die men daarom wil voorkomen, waardoor voor een strengere norm wordt gekozen dan de economisch optimale overstromingskans).

Het onderwerp 'bepalen overstromingskans' speelt uiteraard ook een belangrijke rol bij het toetsen of ontwerpen aan de uiteindelijk vastgestelde norm.



Figuur 1-1: Overzicht onderwerpen binnen veiligheidsbenadering.

1.3 Doel rapportage

In deze rapportage worden per onderwerp (zoals beschreven in bovenstaande paragraaf) de belangrijkste conclusies en inzichten uit de vier pilots beschreven. Hierbij wordt niet zozeer gefocust op concrete resultaten van de pilots (zoals hoe groot het schadebedrag is bij een overstroming), maar meer op algemene inzichten en op de methodes die zijn gehanteerd bij de uitwerking (belangrijke voor- en nadelen, en verschillen met de vigerende methodes). Daarnaast komen opvallende verschillen tussen de pilots aan bod.

Deze rapportage is gebaseerd op de afzonderlijke pilotrapportages. Daarnaast is er een duidelijk verband met het bouwstenenrapport (zie Tabel 1-1). Het bouwstenenrapport kan worden beschouwd als een globale handleiding voor de uitvoering van de pilots, terwijl voorliggend conclusierapport de belangrijkste inzichten en conclusies beschrijft.

2 Gevolgenbepaling

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk richt zich op de gevolgen van een overstroming bij een doorbraak van een regionale kering. In het bouwstenenrapport (zie Tabel 1-1) is een methode beschreven waarop de gevolgen van een doorbraak van een regionale kering bepaald kunnen worden. Hierbij is ook een groslijst opgenomen van mogelijke gevolgen en schades, die beschouwd dienen te worden (indien van toepassing). Deze methode kijkt breder dan de huidige praktijk: niet alleen de inundatieschade in de achterliggende polder, maar ook alle andere gevolgen van een overstroming worden beschouwd, zoals keteneffecten (schade in omliggende polders door uitval van vitale processen), schade aan het boezemstelsel (zowel directe schade als schade door uitval van processen als scheepvaart en aan- en afvoer van water), aantallen getroffen en indien van toepassing zelfs aantallen slachtoffers. Hierbij is een grof-naar-fijn methode toegepast, waarbij alleen die gevolgen in detail zijn uitgewerkt en gekwantificeerd die daadwerkelijk significant zijn voor de normstelling (economisch optimale overstromingskans). Overige gevolgen kunnen kwalitatief worden meegenomen. Voor een gedetailleerde beschrijving van de gehanteerde methode voor de gevolgenbepaling wordt verwezen naar het bouwstenenrapport. We merken op dat deze methode niet in alle pilots tot in detail is gevolgd. In sommige pilots is ter vereenvoudiging van de methode afgeweken.

2.2 Inzichten en conclusies

Hieronder zijn de belangrijkste inzichten en conclusies rondom de gevolgenbepaling in de vier pilots opgesomd. Hierin is onderscheid gemaakt tussen verschillende onderwerpen.

Overstromingsberekeningen

In de vier pilots zijn verschillende detailniveaus gehanteerd in de overstromingsberekeningen (als input voor de schademodelen):

- Voor pilotlocatie Regionale rivier - landelijk is de waterstand op de Hunze geprojecteerd op het achterliggende gebied. De waterdieptes in het overstroomde gebied zijn in dat geval gelijk aan de waterstand op de Hunze minus de maaiveldhoogte op basis van AHN-data. Hierbij is impliciet (en conservatief) aangenomen dat het peil op de Hunze niet daalt door overloop of bresvorming, en dat er voldoende toevoer van water is om de waterdieptes in het achterland te doen stijgen tot aan het peil in de Hunze. Hierbij zijn geen stroom- en stijgsnelheden berekend. Op basis van het debiet in de Hunze waren de te verwachten waterdieptes en stroom- en stijgsnelheden echter klein, waardoor de kans op slachtoffers verwaarloosbaar is. Rekenen met een overstromingsmodel zonder stroom- en stijgsnelheden is dan geoorloofd¹. Bovendien zijn de berekende gevolgen beperkt, en leiden tot de laagste normklasse (bij huidige IPO-norm); een gedetailleerde (en minder conservatieve) aanpak leidt dus niet tot een andere norm.
- Voor pilotlocaties Boezemkade - stedelijk en Regionale rivier - stedelijk zijn gedetailleerdere overstromingsberekeningen gemaakt met SOBEK, waarbij ook stroom- en stijgsnelheden zijn berekend. Voor de Regionale rivier - stedelijk zijn ook slachtoffers berekend, hierover later meer.

¹ Slachtofferberekeningen kunnen alleen gemaakt worden wanneer stroom- en stijgsnelheden bekend zijn, zie ook het bouwstenenrapport

- Voor de pilot Boezemkade - landelijk is niet alleen de eindwaarde van de schade bepaald, maar is ook het verloop van de overstroming (waterdiepte) en de bijbehorende schade over de tijd in beeld gebracht. Juist voor deze pilot geeft dit extra inzicht, omdat hier sprake is van verschillende afzonderlijke kommen/compartimenten in het achterland, gescheiden door hoge lijnelementen. Pas na verloop van tijd overstroomt ook het tweede compartiment (die niet direct aan het water ligt) met een sprong in de schade als gevolg.

Op basis van bovenstaande blijkt dat het benodigde detailniveau van de overstromingsberekeningen afhangt van de situatie. In een situatie waarbij relatief weinig schade en geen slachtoffers verwacht worden, kan volstaan worden met een simpel en conservatief overstromingsmodel zoals gehanteerd bij de Hunze. Bij grotere verwachte schade, of indien wel slachtoffers verwacht worden, zijn gedetailleerdere overstromingsmodellen nodig, waarbij (in ieder geval voor het berekenen van slachtoffers) ook de stroom- en stijgsnelheid wordt berekend. Daarnaast is het in situaties met een discontinu verloop van de overstroming (en bijbehorende ontwikkeling van de schade), zoals Boezemkade – landelijk, nuttig om het verloop van de schade in de tijd in kaart te brengen (uit het oogpunt van nog te treffen noodmaatregelen).

Bij de Hunze is sprake van een relatief groot verhang van de rivier, en een verlopend maaiveldniveau. De grootte van de overstroming en de bijbehorende schade hangt af van de locatie van de bres. Hier dient in dergelijke gevallen rekening mee gehouden te worden.

Tot slot wijzen de pilots uit dat de gevolgen van een kering doorbraak afhangen van de beschouwde herhalingstijd van de waterstand. Dit geldt vooral voor keringen langs regionale rivieren, waar sprake is van significante waterstandsvariatie. Voor deze keringen dienen dus meerdere extremen/herhalingstijden beschouwd te worden. Deze aanpak is eerder beschreven in [STOWA, 2008].

Schademodelen

Zoals vermeld in het bouwstenenrapport zijn er twee schademodelen die gebruikt kunnen worden: SSM-2017 en de Waterschadeschatter (WSS). In [HKV, 2022] zijn de modellen theoretisch met elkaar vergeleken. Over het algemeen kan worden gesteld dat de WSS geschikt is voor waterdieptes (in het overstroomde gebied) tot 30cm, en SSM voor grotere waterdieptes (tot enkele meters). WSS bereikt bij een diepte van 30cm namelijk al de maximale schade; nog grotere dieptes maken in dit model geen verschil meer. Daarnaast wordt opgemerkt dat WSS enkel schade berekent en SSM ook aantallen getroffen en slachtoffers.

In twee pilots zijn de uitkomsten van beide modellen met elkaar vergeleken:

- Voor Boezemkade - landelijk is met SSM een schade berekend van 45 miljoen € en met WSS een schade variërend van 16 miljoen € tot 30 miljoen € (afhankelijk van de duur van de overstroming).
- Voor Regionale rivier - stedelijk is met SSM een schade berekend van 820 miljoen € en met WSS van ca. 950 miljoen €.

In beide pilots worden waterdieptes van meer dan 1,5m berekend. Op basis van [HKV, 2022] zijn de resultaten volgend uit SSM daarom realistischer. De vergelijking laat wel zien dat de verschillen tussen beide modellen groot kunnen zijn. Het is daarom belangrijk om bij de toekomstige normering vooraf goed te beschouwen welk model het best geschikt is voor de situatie.

Aanvullende gevolgen (bovenop schademodelen)

In de pilots is een duidelijke grof naar fijn methode gehanteerd, zoals beschreven in het bouwstenenrapport. Eerst is de gevolgschade in het overstromde gebied bepaald aan de hand van schademodelen; deze gevolgschade is beschouwd als referentieschade. Vervolgens is in kaart gebracht welke aanvullende gevolgen kunnen optreden, zoals schade aan vitale objecten en infrastructuur, keteneffecten (uitval vitale infrastructuur, schade door maalstops) en schade aan het boezemstelsel. Voor deze aanvullende gevolgen is (door middel van eenvoudige berekeningen en redeneerlijnen) ingeschat of deze significant kunnen zijn. Dit is het geval wanneer de cumulatieve aanvullende schade (naar verwachting) minimaal even groot is als de referentieschade die volgt uit de schademodelen (zie bouwstenenrapport).

In geen van de pilots blijken de aanvullende gevolgen significant te zijn; de schade die volgt uit de schademodelen is dominant ten opzichte van de aanvullende gevolgen. De aanvullende gevolgen zijn daarom niet in detail gekwantificeerd en niet opgenomen in het totale schadebedrag². Uit de pilots blijkt het nut van de gehanteerde grof naar fijn methode; alle mogelijke gevolgen van een kering doorbraak zijn beschouwd, zonder dat het kwantificeren van de gevolgen onnodig veel werk heeft gekost.

Overigens betekenen de uitkomsten van de pilots niet dat aanvullende gevolgen nooit significant zijn. Het is goed mogelijk dat voor de gebieden met weinig economische waarde keteneffecten en schade aan de boezem dominant zijn ten opzichte van directe schade als gevolg van overstroming van het gebied (volgend uit schademodelen).

In de pilots voor Boezemkade - stedelijk en de Regionale rivier - stedelijk is geconcludeerd dat uitval van snelwegen tot significante aanvullende schade kan leiden, in de orde van miljoenen €. De schade als gevolg van deze uitval is echter zeer onzeker. Fundamentele vraag is daarom of deze schade (mits relevant) zou moeten worden meegenomen in het totale schadebedrag. De voorlopige aanbeveling is om deze schade enkel kwalitatief mee te nemen, en niet te monetariseren. Bij de definitieve vaststelling van de veiligheidsbenadering en bijbehorende werkwijze dient hier een definitieve keuze in te worden gemaakt.

Slachtoffers en getroffen

Naast gevolgschade zijn in de pilots ook de aantallen slachtoffers en getroffen als gevolg van een kering doorbraak beschouwd. In de vier pilots zijn de volgende slachtofferaantallen bepaald:

- Voor pilot Regionale rivier - landelijk is de Waterschadeschatter als schademodel gebruikt, waarmee geen slachtoffers berekend kunnen worden. Door de beperkte waterdiepte en lage stroomsnelheden kan echter worden gesteld dat de kans op slachtoffers verwaarloosbaar is;
- Voor Boezemkade - landelijk is met SSM een slachtofferaantal van 0 berekend. Er vallen geen slachtoffers;
- Voor Boezemkade - stedelijk is met SSM een slachtofferaantal van 5 berekend. In deze pilot is echter gesteld dat een dergelijk laag aantal als niet relevant moet worden beschouwd, omdat de slachtofferfuncties bij dergelijke lage aantallen (en dus lage stroom- en stijgsnelheden) omgeven zijn door grote onzekerheid, en de uitkomst niet betrouwbaar is. Bovendien is in de modellen nog geen rekening gehouden met evacuatie. Op basis van de beperkte waterdieptes en lage stroomsnelheden zijn er in Boezemkade - stedelijk helemaal geen slachtoffers te verwachten, zeker wanneer rekening wordt gehouden met evacuatie.

² In de praktijk kunnen deze aanvullende gevolgen, ondanks dat ze niet significant zijn, toch reden zijn om bestuurlijk te kiezen voor een zwaardere norm dan de economisch optimale faalkans die volgt uit een MKBA. Daarom wordt aanbevolen deze schades kwalitatief mee te nemen in de bestuurlijke afweging voor de normstelling.

- Voor de Regionale rivier - stedelijk is met SSM een slachtofferaantal van 36 berekend. Van dit aantal kan niet zonder meer worden gesteld dat dit als niet relevant kan worden beschouwd. Ook hier geldt echter dat nog geen rekening is gehouden met evacuatie.

Over het algemeen kan worden gesteld dat bij een doorbraak van een regionale kering meestal geen slachtoffers vallen, door de vaak beperkte waterdieptes en stroomsnelheden. Dit volgt ook uit de bevindingen van de pilots. Indien voldoende aannemelijk kan worden gemaakt dat er geen slachtoffers vallen, zijn geen slachtofferberekeningen nodig en kan vaak worden volstaan met relatief eenvoudige overstromingsberekeningen (zonder stroomsnelheden), mits dit past bij de aard van de overstroming en bijbehorende schade. Indien niet aannemelijk kan worden gemaakt dat er geen slachtoffers vallen, dienen wel slachtofferberekeningen gemaakt te worden (en zijn gedetailleerdere overstromingsberekeningen, inclusief stroom- en stijgsnelheden, nodig). Daarbij lijkt het verstandig om een minimaal aantal slachtoffers vast te stellen waarbij de berekening voldoende betrouwbaar is, en waarbij slachtoffers meegenomen dienen te worden in de normering. We spreken dan van een relevant aantal slachtoffers. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de mogelijkheid op evacuatie. In het bouwstenenrapport is als grenswaarde voor dit minimale aantal slachtoffers een aantal van 5 gekozen. Bij de definitieve vaststelling van de veiligheidsbenadering en bijbehorende werkwijze dient hier een definitief besluit over te worden genomen.

Om het aantal slachtoffers, indien relevant, mee te nemen in de normering, ligt een werkwijze op basis van LIR (lokaal individueel risico) voor de hand. LIR is gedefinieerd als de jaarlijkse kans dat een fictief persoon aanwezig op een bepaalde locatie komt te overlijden als gevolg van een overstroming, daarbij rekening houdend met de mogelijkheid van preventieve evacuatie. In Nederland is het LIR vastgesteld op 1/100.000 per jaar. In de pilot Regionale rivier - stedelijk is het LIR onderzocht, maar blijkt dit niet bepalend te zijn voor de norm; de economisch optimale overstromingskans (op basis van een MKBA) is dominant.

Daarnaast is een optie om de slachtoffers te monetariseren, en direct mee te laten wegen in de norm op basis van een MKBA.

Een derde optie is om het aantal slachtoffers enkel mee te laten wegen in de bestuurlijke keuze voor de uiteindelijke normstelling. Deze werkwijze is weliswaar niet uniform, maar naar verwachting zijn slachtoffers alleen relevant in specifieke situaties.

Uiteindelijk dient bij de definitieve vaststelling van de veiligheidsbenadering en bijbehorende werkwijze gekozen te worden hoe met slachtoffers (indien relevant) wordt omgegaan in de norm.

In de pilots is het aantal getroffen personen telkens gelijkgesteld aan het aantal inwoners in het overstroomde gebied³. Dit zijn:

- Boezemkade - stedelijk: 6500 getroffen personen
- Regionale rivier - landelijk: 2700 getroffen personen
- Boezemkade - landelijk: 11 getroffen personen
- Regionale rivier - stedelijk : 20.000 getroffen personen

Indien het aantal getroffen personen zeer hoog is, is het wenselijk dit terug te laten komen in de norm. Hiervoor zou een norm op basis van groepsrisico (conform de normering voor primaire keringen) gebruikt kunnen worden. We bevelen aan nader te onderzoeken of een dergelijke werkwijze wenselijk is en zo ja, hoe deze norm op basis van groepsrisico exact moet worden ingericht.

³ Hierbij wordt opgemerkt dat het in de praktijk nodig kan zijn het aantal getroffen personen te corrigeren. Bijvoorbeeld wanneer in het overstroomde gebied verzamelplekken liggen waar veel mensen gelijktijdig aanwezig zijn.

3 Systeemmaatregelen

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk komen systeemmaatregelen aan bod. Dit zijn gevolgbeperkende maatregelen aan het boezemstelsel of in het achterland, die kunnen worden ingezet bij dreigende hoogwatersituaties (preventief) of bij een doorbraak van een kering (reactief).

In de vier pilots zijn de haalbaarheid en invloed van verschillende systeemmaatregelen onderzocht. Een overzicht van verschillende maatregelen is te vinden in het bouwstenenrapport. Belangrijk om te realiseren bij de inzet van systeemmaatregelen is dat deze doorgaans leiden tot een reductie van de schade in overstroomde gebied, maar daarnaast kunnen leiden tot extra schade in naastgelegen gebieden of in het boezemstelsel.

3.2 Inzichten en conclusies

Hieronder volgen de belangrijkste conclusies en inzichten rondom de inzet van systeemmaatregelen, opgedaan in de vier pilots.

In elke pilot is ingeschat welke systeemmaatregelen mogelijk zinvol zijn. In hoeverre een maatregel daadwerkelijk zinvol en relevant is, hangt af van de baten (bestaande uit de reductie van de gevolgschade bij een overstroming) en de kosten (bestaande uit de kosten van de maatregel en de eventuele extra schade als gevolg van inzet van de maatregel). Wanneer de baten groter zijn dan de kosten, is de maatregel kosteneffectief, en is het zinvol de maatregel in te zetten bij een (dreigende) kering doorbraak. Wanneer een systeemmaatregel daarnaast leidt tot een significante reductie van de totale gevolgschade bij een doorbraak (minimaal factor 2 reductie, zie bouwstenenrapport), is de maatregel bovendien significant voor de normstelling. Meenemen van de systeemmaatregel in een MKBA leidt dan tot een (significant) hogere economisch optimale overstromingskans (en vaak een soepelere norm).

De pilot Boezemkade - stedelijk laat zien dat reactieve maatregelen (zoals het dichten van de bres of het compartimenteren van de boezem na een kering doorbraak) weinig invloed hebben op de gevolgschade wanneer sprake is van een snelle instroom van water. Voordat maatregelen effect hebben, is het meeste water namelijk al de polder ingestroomd. In dat geval zijn systeemmaatregelen dan ook niet significant voor de normstelling. Uiteraard blijft het belangrijk om de bres te dichten na een doorbraak. Het proactief inzetten van maatregelen (zoals het compartimenteren van de boezem bij een dreigende kering doorbraak) kan wel leiden tot significante schadereductie. Proactieve maatregelen resulteren echter ook in extra kosten, doordat ze ook 'onnodig' worden ingezet (wanneer uiteindelijk geen sprake is van een kering doorbraak). Uit bovenstaande blijkt dat inzicht in het verloop van de ontwikkeling van de schade nodig is, om het nut en de invloed van systeemmaatregelen te kunnen beoordelen. Een goed voorbeeld hiervan is pilot Boezemkade - landelijk, waar het verloop van de schade over de tijd goed in beeld is gebracht (zie hoofdstuk 2).

Bij regionale rivieren, zoals bij de pilots Regionale rivier - stedelijk en Regionale rivier - landelijk, is sprake van veel toevoer van watervolume. Compartimenteren van het water is daarom vaak weinig kansrijk, omdat het water dat van bovenstrooms wordt aangevoerd geborgen moet kunnen

worden. Bij boezemstelsels is doorgaans sprake van minder aanvoer van water bovenstrooms. Voor boezemstelsels kan compartimenteren daarom wel kansrijk zijn, mits het compartimenteren uitvoerbaar is (lees: relatief lage stroomsnelheden en smalle boezem).

De verschillende pilots laten zien dat het loont om niet enkel te kijken naar de standaardmaatregelen uit het bouwstenenrapport (zoals dichten bres, compartimenteren en maalstops), maar ook gebruik te maken van de specifieke kenmerken van het gebied. Voorbeelden hiervan zijn:

- In de pilot Regionale rivier - stedelijk wordt een groot deel van de gevolgschade bij een keringdoorbraak veroorzaakt door water dat via de A59 door een tunnel naar het laaggelegen achterland stroomt. Door kanteldijkjes te plaatsen aan weerszijden van de A59 kan worden voorkomen dat water deze tunnel instroomt, en kan de gevolgschade drastisch worden verkleind (met factor 100).
- In pilot Boezemkade - landelijk is sprake van meerdere kommen/compartimenten in het achterland, die van elkaar worden gescheiden door hoger gelegen wegen. Bij een keringdoorbraak zal het compartiment dat aan de bres gelegen is als eerst inunderen. Pas wanneer de waterstand in dit compartiment hoger wordt dan de weg, inunderen ook naastgelegen compartimenten. Door deze wegen op te hogen, kan het inunderen van naastgelegen compartimenten worden voorkomen. Hierdoor blijft de schade beperkt tot het aan de bres gelegen compartiment. Dit kan leiden tot een flinke schadereductie.
- Bij de Regionale rivier - landelijk is ook sprake van verschillende compartimenten, die van elkaar gescheiden worden door hoger gelegen weglichamen. Door de duikers, die door deze weglichamen lopen, dicht te zetten, wordt voorkomen dat een inundatie zich verspreid naar een naastgelegen compartiment.
- In pilot Boezemkade - stedelijk is geconcludeerd dat er flinke schade kan ontstaan door stremming van de snelweg A20, doordat water op de weg komt te staan bij een viaduct. Dit kan voorkomen worden door een kanteldijkje te plaatsen langs het viaduct.

In alle vier de pilots blijkt dat systeemmaatregelen niet significant zijn voor de normstelling. Dit betekent echter niet dat dit altijd het geval is. In sommige gevallen kunnen systeemmaatregelen wel degelijk significant zijn voor de normstelling, daarom is het altijd aan te raden om de (mogelijke) invloed van systeemmaatregelen te beschouwen. Indien systeemmaatregelen significant zijn voor normstelling, kunnen deze worden meegenomen in een MKBA (waaruit de economisch optimale overstromingskans volgt). In de MKBA kunnen zowel de positieve werking (schadereductie) als de negatieve werking (extra schade aan boezemstelsel of door maalstops) worden verwerkt in de gevolgschade, en kunnen daarnaast de kosten van de systeemmaatregel zelf worden opgenomen.

Indien systeemmaatregelen inderdaad worden meegenomen in de normstelling, dient aannemelijk te worden gemaakt dat deze ook met voldoende betrouwbaarheid kunnen worden ingezet (zie ook het bouwstenenrapport). Om dit aannemelijk te maken, kan gebruik worden gemaakt van kentallen uit de online wiki noodmaatregelen. Dergelijke kentallen zijn gebruikt in de pilot Regionale rivier - stedelijk . Bij de definitieve vaststelling van de veiligheidsbenadering dient een werkwijze gekozen te worden om de betrouwbaarheid van systeemmaatregelen (indien relevant) aan te tonen.

4 Bepalen overstromingskans

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk richt zich op het bepalen van de overstromingskans van een polder, beschermd door een regionale kering. In het bouwstenenrapport zijn verschillende methodes besproken om de overstromingskans/betrouwbaarheid van een kering te bepalen. In de vier pilots zijn verschillende van deze methodes gebruikt, telkens met een iets andere focus.

4.2 Inzichten en conclusies

In de meeste pilots is eerst een screening uitgevoerd. Aan de hand van deze screening is voor een polder/dijktraject bepaald welke faalmechanismen en welke doorsnedes bepalend zijn voor de overstromingskans van de gehele polder (of traject), en vooral ook welke faalmechanismen en doorsnedes niet bepalend zijn of zelfs een verwaarloosbare bijdrage hebben aan de overstromingskans. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van oude toetsresultaten en gebiedskennis van de beheerder. Een dergelijke screening blijkt een goede eerste stap; na de screening kan de focus worden gelegd op de faalmechanismen en doorsnedes die er daadwerkelijk toe doen.

Voor het bepalen van de faalkans van de kering op hoogte is in de meeste pilots gebruik gemaakt van PROMOTOR. Hiermee kan relatief eenvoudig de kans worden berekend dat een (deterministisch) kritiek overslagdebiet wordt overschreden. Deze kans kan worden geïnterpreteerd als de faalkans voor hoogte. Deze methode is goed werkbaar, en het ligt dan ook voor de hand deze als standaardmethode te gebruiken.

In pilots Regionale rivier - stedelijk en Boezemkade - landelijk is voor de beoordeling op binnenwaartse stabiliteit gebruik gemaakt van fragility curves, die de relatie beschrijven tussen de waterstand (belasting) en de conditionele faalkans (faalkans gegeven de waterstand). Aan de hand van deze fragility curves kan de jaarlijkse faalkans worden bepaald. Voor Boezemkade - landelijk is hier vervolgens nog 'bewezen sterkte' op toegepast, waarbij de conditionele faalkansen voor waterstanden die de kering reeds succesvol heeft gekeerd, op 0 zijn gesteld, leidend tot een aanscherping van de jaarlijkse faalkans⁴.

In de pilot Boezemkade - stedelijk is ook gebruik gemaakt van fragility curves, maar is gesteld dat voor boezemkades de boezemwaterstand niet het belangrijkste drijvende mechanisme is voor binnenwaartse afschuivingen, omdat er nauwelijks sprake is van waterstandsvariatie. De freatische lijn in het dijklichaam en de verkeerslast zijn belangrijker⁵. Daarom is in deze pilot gebruik gemaakt van 3D-fragility curves, waarin zowel de freatische lijn als de verkeerslast als variabele belastingen zijn meegenomen. Deze 3D-fragility curves beschrijven de conditionele faalkans gegeven een bepaalde freatische lijn én gegeven een verkeerslast. Door expliciet te zoeken naar de belangrijkste belastingen en juist deze als variabele te nemen in de fragility curves, ontstaat een

⁴ Hierbij dient wel de kanttekening te worden geplaatst dat in de pilot is aangenomen dat tijdens deze historische waterstanden altijd sprake was van zwaar verkeer (gelijk aan de toetssituatie) op de kering. Dit is mogelijk een te gunstige aanname.

⁵ Merk op dat dit betekent dat de huidige overschrijdingskansnorm niet geheel recht doet aan het gedrag van boezemkaden. De overschrijdingskansnorm is enkel gericht op een te keren buitenwaterstand, terwijl een buitenwaterstand voor de stabiliteit van boezemkaden niet het belangrijkste drijvende mechanisme is.

berekening die zo goed mogelijk aansluit bij de werkelijke kering, en daarmee een zo goed mogelijke schematisatie. Ook in de pilot Boezemkade - stedelijk is bewezen sterkte toegepast, op de 3D-fragility curves.

Groot voordeel van de fragility curves is dat deze niet alleen leiden tot een (jaarlijkse) faalkans, maar ook aanvullende inzichten geven voor de beheerder. Aan de hand van de fragility curve kan de beheerder namelijk inschatten bij welke situaties (vanaf welke belasting) de veiligheid van de kering in het geding komt, en deze kennis gebruiken in de crisisorganisatie. Het expliciet beschouwen van de veiligheid van de kering in verschillende situaties – bij verschillende (combinaties van) belastingen – helpt bovendien bij het bepalen van de juiste beoordelingsstrategie.

PROMOTOR berekeningen en fragility curves zijn gericht op het bepalen van een faalkans in de doorsnede en voor een bepaald faalmechanisme. Het doel bij een overstromingskansbenadering is uiteindelijk de totale overstromingskans voor de polder te vergelijken met de maximaal toelaatbare overstromingskans (de norm). Hiervoor is in de pilots Regionale rivier - stedelijk, Boezemkade - landelijk en Boezemkade - stedelijk een bottom-up methode gehanteerd, waarbij de faalkansen op doorsnedeniveau worden opgeteld tot een faalkans voor de hele polder per faalmechanisme, waarna deze kansen voor de verschillende mechanismen bij elkaar worden opgeteld, leidend tot de overstromingskans van de gehele polder. Dit is wiskundig gezien de meest nauwkeurige methode en bovendien minder conservatief dan een top-down methode, omdat geen impliciete standaard aannames worden gedaan (zie het bouwstenenrapport).

De bottom-up methode heeft daarom de voorkeur. Het optellen naar een totale overstromingskans voor de polder is afhankelijk van onderlinge correlaties. In de pilots is hier op een praktische manier mee om gegaan, op basis van onderbouwde aannames of door bandbreedtes van overstromingskansen te presenteren. Aanbevolen wordt om bij de verdere uitwerking van de veiligheidsbenadering nadrukkelijk aandacht te besteden aan een geschikte werkwijze voor een dergelijke bottom-up methode.

In de pilot Regionale rivier - landelijk is gekozen voor een andere werkwijze, waarbij een instandhoudingsprofiel is opgesteld, dat (op doorsnedeniveau) voldoet voor alle faalmechanismen. Dit blijkt een methode waarmee snel en eenvoudig een volledig traject (of een gehele polder) kan worden beoordeeld, en is daarmee vooral geschikt voor trajecten/polders waarvan de verwachting is dat deze ruim voldoen aan de norm. Nadeel van deze methode is dat deze top-down werkt, waarbij de overstromingskansnorm voor de hele polder moet worden vertaald naar eisen op doorsnedeniveau per faalmechanisme. Hiervoor zijn faalkansverdelingen en lengte-effectfactoren nodig (conform WBI), die vaak onzekerheid en conservatisme in de beoordeling brengen. Aanbevolen wordt om bij de verdere uitwerking van de veiligheidsbenadering aandacht te besteden aan hoe hier mee om kan worden gegaan.

Over het algemeen zien we in de pilots dat onrealistisch hoge faalkansen worden berekend. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het feit dat eerder gemaakte schematisatiekeuzes zijn overgenomen. Wanneer in de toekomst daadwerkelijk wordt overgestapt naar een overstromingskansbenadering, dienen ook schematisatiekeuzes kritisch tegen het licht gehouden te worden, waarbij meer wordt geschematiseerd op basis van verwachting/realisme in plaats van veilige aannames.

5 MKBA

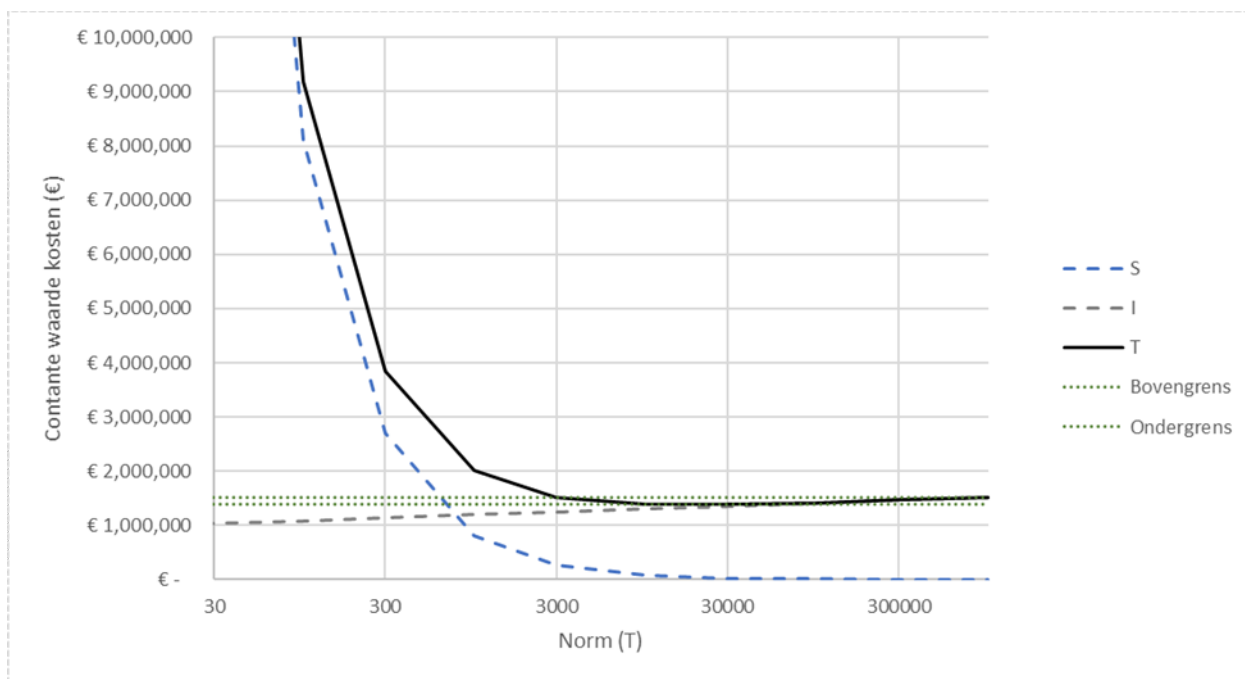
5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk richt zich op het bepalen van de economisch optimale overstromingskans aan de hand van een MKBA (maatschappelijke kosten-batenanalyse). In alle vier de pilots is een MKBA uitgevoerd. Hieronder volgen de belangrijkste inzichten en conclusies.

5.2 Inzichten en conclusies

De verschillende pilots laten zien dat het zinvol kan zijn onderscheid te maken tussen een toetsnorm en een ontwerpnorm. Als de kering niet langer voldoet aan de toetsnorm is een versterking nodig. De ontwerpnorm is de economisch optimale overstromingskansnorm voor het ontwerp, gegeven dat een kering niet meer voldoet aan de toetsnorm en een versterking nodig is. In alle vier de pilots is de berekende toetsnorm soepeler dan de ontwerpnorm. Dit betekent dat het economisch gezien verstandig is een versterking zo lang mogelijk uit te stellen, maar als een versterking dan toch nodig is, robuust te versterken.

De pilots laten een grote bandbreedte zien in de optimale ontwerpnorm: de curve met totale kosten (investeringskosten + overstromingsrisico) loopt erg vlak. Dit betekent dat de totale kosten niet veel hoger worden wanneer de kering tot een strengere norm (dan het economisch optimum) wordt versterkt, en geeft dus ook aan dat het loont robuust te versterken. Ter illustratie toont Figuur 5-1 de resultaten van de MKBA van pilot Boezemkade - stedelijk. De zwarte lijn toont de contante waarde van de totale kosten. De optimale ontwerpnorm is de norm waarbij de totale kosten minimaal zijn, dus bij $T=10.000$. Aanvullend tonen de groene lijnen een bandbreedte van 10% in de totale kosten. Achterliggende gedachte hierbij is dat een 10% hogere contante waarde van de kosten weinig praktische betekenis heeft. Bij deze bandbreedte hoort een range in normen tussen $T=3.000$ en $T=500.000$. Dit betekent dat versterken tot een $T=500.000$ norm in plaats van de optimale $T=10.000$ norm, slechts tot 10% hogere totale kosten (contante waarde) leidt.



Figuur 5-1: MKBA ontwerpnorm pilot Boezemkade - stedelijk

Zoals uitgelegd in het bouwstenenrapport is het voor het toekomstige normeren van regionale keringen niet per definitie nodig om voor elke polder of elk dijktraject een MKBA uit te voeren. Het is ook mogelijk te normeren op basis van een afgeleide/vastgestelde relatie tussen schadebedrag en economisch optimale overstromingskans (ofwel het acceptabele schadebedrag bij verschillende normen), waarbij men bij de berekende gevolgschade direct de economisch optimale overstromingskans kan aflezen.

In de verschillende pilots zijn voor de MKBA verschillende investeringskosten berekend en/of ingeschat, die relatief ver uit elkaar liggen. De verwachting is dat deze verschillen in investeringskosten ook leiden tot verschillen in acceptabele schadebedragen (bij een bepaalde ontwerpnorm)⁶. Tabel 5-1 toont het acceptabele schadebedrag bij verschillende normen voor de verschillende pilots. In pilots Boezemkade - stedelijk en Boezemkade - landelijk zijn deze acceptabele schadebedragen expliciet onderzocht. Bij de pilots Regionale rivier - stedelijk en Regionale rivier - landelijk is dit niet gedaan; hier is ter illustratie het schadebedrag bij de economisch optimale overstromingskans (ontwerpnorm) opgenomen.

In de tabel valt direct op dat de acceptabele schadebedragen (bij dezelfde norm) flink verschillen tussen de verschillende pilots, en dus voor verschillende typen dijken. Het lijkt dan ook niet haalbaar om te werken met één vaste relatie tussen schadebedrag en economisch optimale overstromingskans. Daarom wordt aanbevolen om bij het verder uitwerken van de veiligheidsfilosofie aandacht te besteden aan differentiatie van deze relatie naar type kering; dus per type kering een eigen relatie tussen schadebedrag en economisch optimale overstromingskans (norm).

⁶ Het acceptabel schadebedrag bij een bepaalde ontwerpnorm (bijvoorbeeld 1/100) is het schadebedrag waarmee de MKBA uitkomt op een economisch optimale overstromingskans gelijk aan die specifieke norm (1/100).

Tabel 5-1: Acceptabele schadebedragen bij normen

Pilot	Norm	Acceptabel schadebedrag [miljoen €]
Boezemkade - stedelijk	1/100	0,1
	1/1.000	1
	1/10.000	10
Boezemkade - landelijk	1/100	5
	1/1.000	60
	1/10.000	600
Regionale rivier - stedelijk	1/10.000	2.150
Regionale rivier - landelijk	1/100	0,7

In de pilot Boezemkade - stedelijk is aanvullend nog rekening gehouden met het feit dat vanwege ruimtegebrek niet altijd versterkingen als groene keringen mogelijk zijn. Vanaf een bepaalde norm is bijvoorbeeld een damwand nodig, met hogere kosten. Dit heeft invloed op de optimale ontwerpnorm, en dient daarom altijd meegenomen te worden in een MKBA. In dergelijke gevallen ligt normering op basis van een vaste relatie tussen schadebedrag en economisch optimale overstromingskans niet voor de hand.

6 Referenties

USACE, 2015

USACE Levee Screening Tool – Application Guide and Technical Reference Manual: Introduction, LST version 3.8, juni 2015

HKV, 2022

Memo Verschilanalyse Watersschadeschatter en SSM-2017, Jakolien Leenders, 5 augustus 2022

Wim Kanning et al., 2017

Derivation of the semi-probabilistic assessment rule for inner slope stability

STOWA, 2008

Richtlijn – Normering keringen langs regionale rivieren, ORK 2008-04

Veiligheids- benadering regionale keringen

Bouwstenenrapport



Opdrachtgever



STOWA



Veiligheids- benadering regionale keringen



Bouwstenenrapport

Eindrapport

Auteur(s)

Mick van Montfoort
Bas Kolen

PR4503.10

Juni 2023

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Onderwerpen pilots	2
1.3	Doel bouwstenenrapport	3
2	Gevolgenbepaling	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Richtinggevende principes	5
2.3	Groslijst overstromingsgevolgen	7
2.4	Stappenplan gevolgenbepaling	10
3	Systeemmaatregelen	17
3.1	Inleiding	17
3.2	Richtinggevende principes	17
3.3	Tabel systeemmaatregelen	19
4	Bepalen overstromingskans	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Overzicht methodes	24
4.3	Vergelijking methodes	27
4.4	Doorsnede- versus trajectniveau	31
5	MKBA	33
5.1	Inleiding	33
5.2	Richtinggevende principes	33
6	Referenties	35
6.1	Referenties	35

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Nederlandse waterkeringsysteem bestaat onder andere uit primaire, regionale en overige keringen. Voor de primaire waterkeringen is recent (2017) overgestapt van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering per dijktraject. Voor regionale keringen wordt momenteel uitgegaan van een overschrijdingskansbenadering. Voor de regionale keringen is verkend op welke wijze de vigerende veiligheidsbenadering kan worden aangepast. Op basis van die verkenning is geconcludeerd dat een regionale benadering wenselijk is, die recht doet aan de verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen. Ten behoeve van de invulling van de specifieke regionale benadering zijn vier pilots uitgevoerd, waarin een top 4 met denkbare aanpassingen zijn uitgetoetst. Voor een goed landelijk beeld zijn hiervoor 2 typen regionale keringen beschouwd, en 2 typen beschermde gebieden. Aldus resulteren 4 pilots, te weten:

- Boezemkade – landelijk: een kade langs een boezem die een landelijk gebied beschermd;
- Boezemkade – stedelijk: een kade langs een boezem die een stedelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – landelijk: een kering langs een regionale rivier die een landelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – stedelijk: een kering langs een regionale rivier die een stedelijk gebied beschermd.

Onderzoeksvragen

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de aanpassing van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. Daartoe zijn de volgende denkbare aanpassingen onderzocht:

- normeren:
 - o uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming, zowel binnen als buiten het overstroomde gebied;
 - o rekening houden met maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
 - o medegebruik: kan medegebruik maatgevende eisen stellen aan de kering die moeten worden meegewogen bij de normstelling van de kering uit oogpunt waterveiligheid;
 - o de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses);
- toetsen:
 - o werkwijzen voor de toetsing.

Afhankelijk van de aard van de pilot zijn binnen de uitwerking de accenten op verschillende onderdelen gelegd. Zo is in één pilot veel aandacht besteed aan het rekening houden met slachtoffers, terwijl in een andere bijvoorbeeld de meerwaarde van een gedifferentieerde (per faalmechanisme) normering. Ook zijn de wijzen waarop is geverifieerd op de sterkte van de kering aan de norm voldoet op verschillende wijzen uitgewerkt, teneinde de bruikbaarheid van enkele (internationale) werkwijzen voor zo'n verificatie te verkennen. Hoewel de pilots dus generiek van opzet zijn, verschillen het detailniveau waarin de onderzoeksvragen zijn uitgewerkt.

Disclaimer

Voor de uitwerking van de pilots is gebruik gemaakt van werkelijke dijkvakken en beschermde gebieden. Het doel van de pilots is de toegevoegde waarde, de haalbaarheid en de consequentie van verschillende aanpassingen van de toets- en normeringsmethodes te onderzoeken. Het verkrijgen van een gedetailleerd en accuraat beeld van de actuele waterveiligheid in de pilotgebieden was nadrukkelijk niet het doel. Uit oogpunt van doelmatigheid van de uitwerking zijn uitgangspunten soms vereenvoudigd of zijn (soms grove) aannamen gedaan, daar waar dat acceptabel was uit oogpunt van de doelstelling van de pilots. Daarmee hebben de resultaten zoals de optimale normen en het aangetoonde veiligheidsniveau geen betekenis voor de beschouwde pilotgebied. Benadrukt wordt daarom dat geen van de conclusies uit dit rapport gebruikt kunnen worden om conclusies aan te verbinden over de beschouwde pilotgebieden.

Deze rapportage is een bouwstenenrapport. Het beschrijft op welke manier een verbeterde veiligheidsbenadering kan worden ingevuld, en welke keuzes hierin gemaakt kunnen worden. Het bouwstenenrapport heeft hiermee ook gediend als handleiding voor de uitvoering van de vier pilots. Deze rapportage vormt een onderdeel van een aantal rapporten die in het kader van deze verkenning zijn uitgebracht. Zie Tabel 1-1.

Tabel 1-1: Rapportages verkenning veiligheidsbenadering

Titel	Auteur
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Boezemkade - stedelijk	M. van Montfoort (HKV)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Regionale rivier - landelijk	M. Kampen & M. Stam (Sweco)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Regionale rivier - stedelijk	M. Monden & D. Wubben (IV-Infra), B. Bouman & N. van dijk (TAUW)
Veiligheidsbenadering regionale keringen: pilot Boezemkade - landelijk	G. van Rinsum (Witteveen+Bos)
Integrale conclusies pilots	M. van Montfoort (HKV)
Bouwstenenrapport	M. van Montfoort (HKV)
Consequentie analyse	E. van der Heijden (STOWA)
Impactanalyse overstromingskansbenadering	J. Caspers & G. Dupuit (HKV)

1.2 Onderwerpen pilots

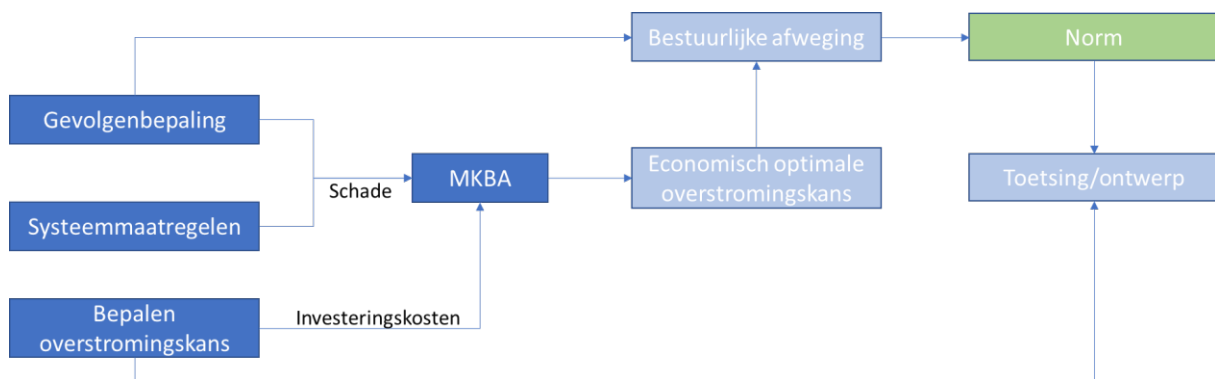
In de pilots zijn de volgende onderwerpen met betrekking tot de veiligheidsbenadering uitgewerkt:

- Gevolgenbepaling: het in kaart brengen en kwantificeren van de gevolgen van een kering doorbraak;
- Watersysteemmaatregelen: ingrepen aan het watersysteem die de gevolgen van een doorbraak reduceren;
- Bepalen overstromingskans: het bepalen/berekenen van de overstromingskans, ter verificatie of aan een gestelde norm wordt voldaan;
- Kosten-baten analyse (MKBA): het bepalen van de economisch optimale overstromingskans.

Figuur 1-1 illustreert welke rol bovenstaande onderwerpen spelen binnen de veiligheidsbenadering. De gevolgenbepaling en systeemmaatregelen bepalen samen het totale schadebedrag als gevolg

van een overstroming. Het onderwerp ‘bepalen overstromingskans’ geeft een beeld van de omvang van maatregelen die nodig zijn om de kering te versterken tot aan een bepaalde norm, en van de bijbehorende investeringskosten. De gevolgschade en de investeringskosten dienen als input in een MKBA, waarmee de economisch optimale overstromingskans kan worden bepaald. Het vaststellen van de norm is uiteindelijk een bestuurlijke afweging. Vaak dient de economisch optimale overstromingskans hiervoor als basis, aangevuld met mogelijke overige overwegingen (bijvoorbeeld gevolgen van een overstroming die bestuurlijk gevoelig liggen en die men daarom wil voorkomen, waardoor voor een strengere norm wordt gekozen dan de economisch optimale overstromingskans).

Het onderwerp ‘bepalen overstromingskans’ speelt uiteraard ook een belangrijke rol bij het toetsen of ontwerpen aan de uiteindelijk vastgestelde norm.



Figuur 1-1: Overzicht onderwerpen binnen veiligheidsbenadering.

1.3 Doel bouwstenenrapport

In dit bouwstenenrapport wordt met name gefocust op de onderwerpen gevolgenbepaling, systeemmaatregelen, het bepalen van de overstromingskans en het uitvoeren van een MKBA. Voor deze onderwerpen wordt beschreven hoe deze in een veiligheidsbenadering kunnen worden ingevuld, en welke keuzes kunnen worden gemaakt. Deze beschrijving heeft gediend als handleiding bij de uitwerking van de vier pilots, en is gevalideerd en waar nodig aangepast bij uitwerking van de koploperpilot (pilot Boezemkade - stedelijk).

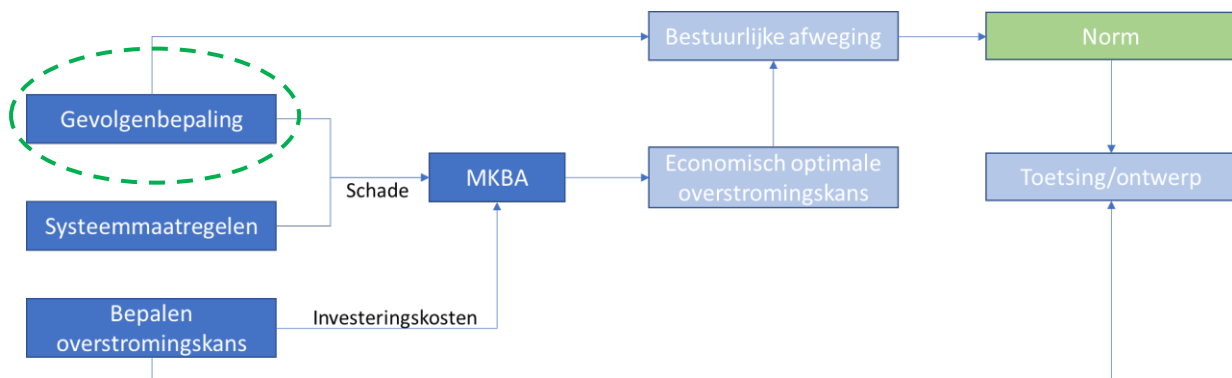
Opgemerkt wordt dat dit bouwstenenrapport enkel mogelijkheden en keuzes beschrijft, het vormt daarmee een achtergrondrapportage, en betreft (nog) geen standaard werkwijze die voor genoemde onderwerpen altijd gevolgd moet worden.

2 Gevolgenbepaling

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk richt zich op de gevolgen van een overstroming bij een doorbraak van een regionale kering. Eerst worden enkele richtinggevende principes geschetst, daarna volgt een groslijst met mogelijke gevolgen, ingedeeld naar het gebied waar deze voorkomen. Vervolgens wordt een aanpak geschetst hoe alle gevolgen bepaald/gekwantificeerd kunnen worden, danwel hoe deze kwalitatief kunnen worden meegenomen (indien gewenst).

Figuur 2-1 illustreert de rol van de gevolgenbepaling binnen de veiligheidsbenadering. De gevolgenbepaling speelt een belangrijke rol binnen de normering van een kering: enerzijds geldt de gevolgschade (schadebedrag) als input voor een MKBA (die leidt tot de economisch optimale overstromingskans), anderzijds kunnen bepaalde zwaarwegende gevolgen reden zijn om in een bestuurlijke afweging te kiezen voor een strengere norm dan de economisch optimale overstromingskans.



Figuur 2-1: Rol van gevolgenbepaling binnen de veiligheidsbenadering

2.2 Richtinggevende principes

Hieronder volgen enkele richtinggevende principes om rekening mee te houden bij het bepalen van de gevolgen van een doorbraak van een regionale kering:

- Een betrouwbaarheidseis waarbij het toezichtregime van regionale keringen passend is, is pas te verwachten bij gevolgschades vanaf 12 miljoen euro. Wanneer de verwachte schade lager is dan 12 miljoen euro¹, is het niet nodig de schade expliciet te bepalen. Op deze manier kan worden voorkomen dat intensieve gevolganalyses worden uitgevoerd bij zeer kleine (verwachte) gevolgen. Het ligt voor de hand voor dergelijke keringen en kades (met kleine gevolgen) een bepaalde vaste norm te definiëren, zodat deze aan een minimaal veiligheidsniveau voldoen.
- Ten behoeve van de normstelling van een regionale kering hoeft een schadeberekening niet nauwkeuriger te zijn dan dat wat onderscheidend is voor besluitvorming over de normstelling.

¹ De grens van 12 miljoen euro volgt uit de huidige IPO-normering, en is de bovengrens van schades voor IPO-klasse I (IPO-klasse I omvat schades tussen 0 en 12 miljoen euro) met een norm van 1/10.

- De economische schade van een kering doorbraak bestaat minimaal uit de directe schade plus een (beperkte) toeslag. Deze minimale schade volgt uit schademodelden (SSM/Waterschadeschatter).
- Een marge van een factor 2 in gevolgschade leidt tot een factor 2 verschil in optimale overstromingskansen (normstelling). Een dergelijke marge zit op de rand van wat praktisch betekenisvol is (in termen van bijvoorbeeld dijkdimensies). Dit betekent dat aanvullende gevolgschades die niet in schademodelden (SSM/Waterschadeschatter) zitten, pas hoeven te worden meegenomen als redelijkerwijs te verwachten is dat deze schades cumulatief minstens zo groot zijn als het schadebedrag dat door de schademodelden berekend is². In dat geval noemen we de schades significant.
- In deze rapportage wordt als schademodel gesproken over SSM (SSM-2017) en de Waterschadeschatter (WSS). In [HKV, 2022] zijn beide modellen met elkaar vergeleken. Over het algemeen kan worden gesteld dat de WSS geschikt is voor waterdieptes (in het overstroomde gebied) tot 30cm, en SSM voor grotere waterdieptes (tot enkele meters). WSS bereikt bij een diepte van 30cm namelijk al de maximale schade; nog grotere dieptes maken in dit model geen verschil meer. Daarnaast is de invoer in beide modellen verschillend: in SSM dienen de waterdieptes in de polder als invoer, in WSS de waterstand (de waterdieptes worden door het model bepaald). Ten slotte wordt opgemerkt dat WSS enkel schade berekent en SSM ook aantallen getroffen en slachtoffers.
- Bij het gebruik van SSM hangt de benodigde nauwkeurigheid van de invoer van de waterdieptes af van de situatie. Een grove methode is een projectie van het toetspeil op het achterland, aan de hand van AHN. Indien nodig kunnen complexere overstromingsmodellen gebruikt worden, bijvoorbeeld wanneer verschillen doorslaggevend kunnen zijn voor de normstelling, of wanneer slachtoffers verwacht worden (om slachtoffers te berekenen zijn ook stroomsnelheden nodig, die volgen uit overstromingsmodellen).
- Voor alle gevolgen geldt dat deze zowel gemonetariseerd (kwantitatief) als niet-gemonetariseerd (kwalitatief) uitgedrukt kunnen worden.
- Als de ernst van de gevolgen adequaat in beeld is gebracht (gemonetariseerd en niet-gemonetariseerd), dan hoeft imagoschade niet afzonderlijk beschouwd te worden, gelet op de overlap/dubbeltelling die anders ontstaat.
- In de normstelling worden enkel de belastingsituaties hoogwater, droogte en storm beschouwd. Falen gerelateerd aan beheeraspecten, zoals schade aan keringen als gevolg van graverijen, worden niet meegenomen in de normstelling. Uitgangspunt is dat dit soort falen kan worden voorkomen door goed beheer.
- Bij de gevolgebepaling kan als uitgangspunt worden gehanteerd dat een overstroming (lees: instroom van water) van een regionaal systeem niet langer dan 2 dagen blijft duren. Achterliggende gedachte hierbij is dat een waterschap in principe in staat moet zijn een bres binnen 48 uur te dichten³. Indien een bepaalde situatie hiertoe aanleiding geeft, kan hier gemotiveerd van worden afgeweken.

² Indien dit niet het geval is, leiden deze aanvullende schades niet tot een factor 2 marge in gevolgschade en optimale overstromingskans, en zijn daarmee praktisch niet betekenisvol (in termen van dijkdimensies).

³ Het feit dat de bres gedicht is na 48 uur wil niet zeggen dat de gevolgen na 48 uur ook zijn opgelost. Het kan langer duren voordat er geen water meer op straat staat.

2.3 Groslijst overstromingsgevolgen

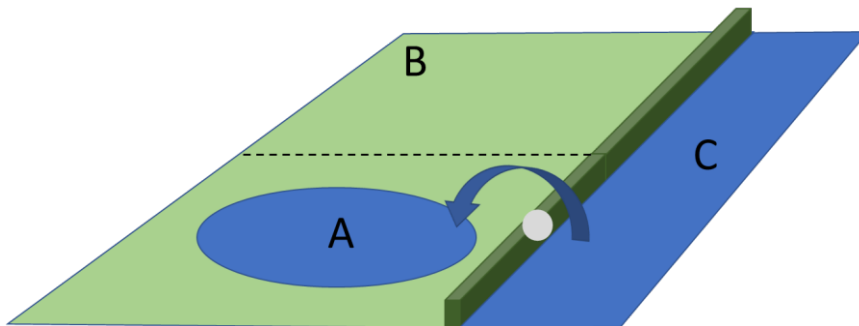
Wat betreft de overstromingsgevolgen maken we onderscheid in de volgende categorieën, die zijn ingedeeld op basis van het gebied dat beïnvloed wordt:

- Gevolgen in de polder die overstroomt door een kering doorbraak (gevolgen door inundatie);
- Gevolgen in omliggende polders, die de nadelige effecten van een doorbraak elders voelen;
- Gevolgen aan het boezemsysteem.

Hieronder volgt per gebied een groslijst met mogelijke gevolgen. Daarbij maken we onderscheid tussen schade, slachtoffers en getroffenen, en tussen directe (schade aan objecten) en indirecte schade.

2.3.1 Gevolgen door inundatie in het gebied van de doorbraak

Schade in het gebied direct achter de kering doorbraak ontstaat door een bres in de regionale kering, waarna water het achterliggende gebied in stroomt. Figuur 2-2 illustreert dit. De figuur toont twee gebieden (A en B). De kering langs gebied A faalt (grijze stip), waarna water gebied A instroomt.



Figuur 2-2: Schade door inundatie in polder van doorbraak

Schade

Hieronder zijn de verschillende soorten schades in gebied A getoond. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen directe (schade aan objecten) en indirecte schade (schade door uitval).

Direct:

- Schade aan woningen (zowel inboedel als opstal);
- Schade aan infrastructuur;
- Schade aan overige categorieën (landbouw, glastuinbouw, recreatie, vliegvelden);
- Schade aan kwetsbare objecten.

Indirect:

- Schade door uitval infrastructuur;
- Schade door bedrijfsuitval;
- Schade veroorzaakt door uitval overige categorieën (landbouw, glastuinbouw, recreatie, vliegvelden);
- Schade door uitval kwetsbare objecten (zoals ziekenhuizen).

De schade in gebied A (direct en deels indirect) wordt standaard berekend met een schademodel (SSM of Waterschadeschatter). Voor indirecte schades geldt dat deze schademodellen uitgaan van gemiddeldes (gemiddelde bedrijven en gemiddelde vitale infrastructuur)⁴. De uitkomsten van de modellen kunnen leiden tot een onderschatting van de schade als in een gebied sprake is van grote keteneffecten, of als er veel kritieke objecten aanwezig zijn. De gemiddeldes die in een schademodel worden gehanteerd, zijn dan niet passend en dienen gecorrigeerd te worden. Hierover later meer.

Als kritieke objecten onderscheiden we:

- Vitale infrastructuur;
- Kwetsbare objecten als ziekenhuizen, zorginstellingen en scholen;
- Rijksmonumenten en cultureel erfgoed;
- Risicolocaties voor milieu (locaties waar inundatie kan leiden tot grote milieuschade, zoals opslaglocaties voor schadelijke stoffen);
- Volgens de Kaderrichtlijn water (KRW) beschermde gebieden (drinkwater winlocaties, zwemwaterlocaties en natura2000 gebieden).

Slachtoffers

Slachtoffers zijn personen die in gebied A komen te overlijden als gevolg van de inundatie/overstroming. Slachtoffers zijn altijd een direct gevolg, er is geen indirecte component. In tegenstelling tot primaire keringen, zullen bij falen van regionale keringen meestal geen slachtoffers vallen vanwege de geringe waterdiepte, stroom- en stijgsnelheid. Aantallen slachtoffers kunnen – indien relevant – worden berekend met het SSM model.

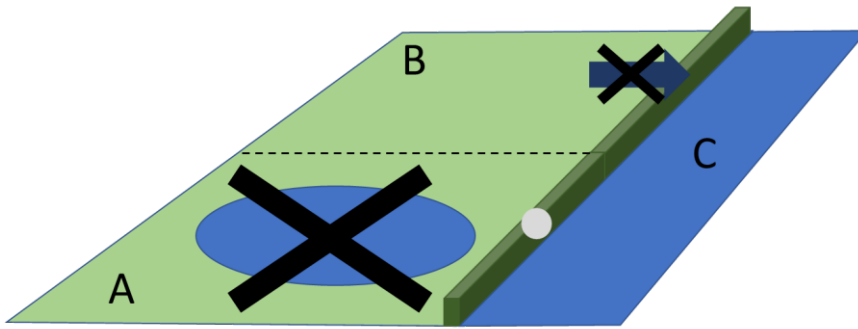
Getroffenen

Getroffenen zijn personen in gebied A die hinder ondervinden van een inundatie/overstroming van een regionale kering. Dit kan zowel direct zijn (in de vorm van 'natte voeten'), als indirect (personen die hinder ondervinden van uitval van bedrijven, kwetsbare objecten en vitale infrastructuur). Het aantal getroffenen kan worden bepaald op basis van overstromingsberekeningen, en zijn de personen die woonachtig of werkzaam zijn in het overstroomde gebied.

2.3.2 Gevolgen in omliggende polders

Inundatie in gebied A, als gevolg van een doorbraak van de waterkering, kan ook zorgen voor hinder en/of schade in naastgelegen gebieden (aangegeven met B). Dit is geïllustreerd in Figuur 2-3. We merken op dat gebied B hier is aangegeven als één polder. In werkelijkheid bestaat gebied B uit alle omliggende gebieden/polders die hinder en/of schade ondervinden.

⁴ Opgemerkt wordt dat beide modellen (SSM en WSS) op een andere manier omgaan met indirecte schade. Hiervoor wordt verwezen naar [HKV, 2022].



Figuur 2-3: Schade in polder B als gevolg van uitval in polder A

Schade

Ook hier maken we onderscheid in directe schade en indirecte schade.

Directe schade:

- Na falen van de kering worden mogelijk maalstops ingezet in naastgelegen gebieden (B), om zo de inundatie in gebied A te verkleinen. Doordat in de naastgelegen gebieden B dan niet meer kan worden afgewaterd, kan daar schade ontstaan door water op straat.

Indirecte schade:

- Uitval van bedrijven en vitale infrastructuur in gebied A kan ook effect hebben op naastgelegen gebieden B (keteneffecten)
- Door het inzetten van maalstops stijgt de grondwaterstand in naastgelegen gebieden B. Dit kan een negatief effect hebben op bijvoorbeeld landbouw.

Slachtoffers

In gebied B zullen doorgaans geen slachtoffers vallen als gevolg van een doorbraak in gebied A.

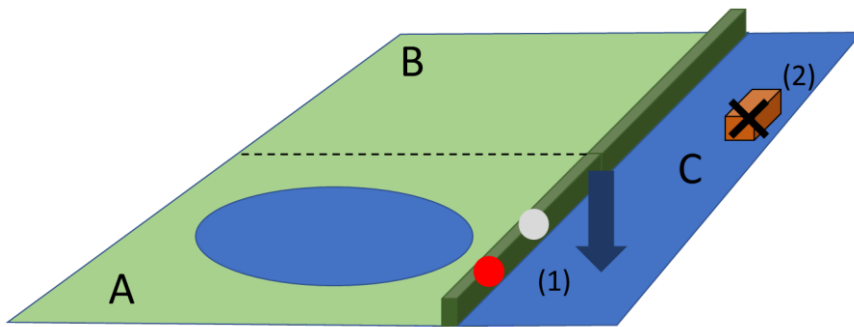
Indien wateroverlast ontstaat als gevolg van maalstops, zullen de waterdieptes slechts gering zijn.

Getroffenen

Getroffenen zijn personen in gebied B die hinder ondervinden als gevolg van een doorbraak in gebied A. Dit kan zowel direct zijn ('natte voeten' als gevolg van maalstops), als indirect (personen die hinder ondervinden van uitval van bedrijven, kwetsbare objecten en vitale infrastructuur in gebied A).

2.3.3 Gevolgen aan het boezemsysteem

Vervolgens onderscheiden we schade gerelateerd aan het boezemsysteem (gebied C). Deze schadecategorie is geïllustreerd in Figuur 2-4.



Figuur 2-4: Schade gerelateerd aan het boezemsysteem

Schade

Ook hier maken we onderscheid in directe schade en indirecte schade.

Directe schade:

- Schade aan de gefaalde kering zelf, inclusief schade aan het boezemland, aan gebouwen naast en/of op de kering en schade aan kabels en leidingen die naast of in de kering liggen.
- Door falen van de kering (grijze stip in Figuur 2-4), zakt de waterstand in de boezem of het kanaal. Door de val van de waterstand kan schade ontstaan elders aan de kering, als gevolg van afschuiven van het buitentalud (rode stip in Figuur 2-4). Dit is geïllustreerd met (1) in Figuur 2-4.

Indirecte schade:

- Mogelijk treedt na falen van de kering stremming van scheepvaart op. Dit is geïllustreerd met (2) in Figuur 2-4.

Slachtoffers

In gebied C zullen geen slachtoffers vallen als gevolg van een doorbraak in gebied A.

Getroffenen

Getroffenen zijn personen in gebied C die hinder ondervinden als gevolg van een doorbraak in gebied A. Dit zijn bijvoorbeeld de schippers, die geen gebruik meer kunnen maken van de scheepvaartroute. De getroffen in gebied C zijn indirect.

2.4 Stappenplan gevolgebepaling

Om de gevolgen van een kering doorbraak te bepalen, kan het volgende stappenplan worden gevolgd:

1. Selectie van een tracé van de waterkering waarvoor het schadebeeld bij een doorbraak vergelijkbaar is. Een bres ergens in dit tracé leidt dan tot eenzelfde schadebeeld. De gevolgebepaling is vervolgens representatief voor het hele traject. Uitgangspunt is dat een vergelijkbaar schadebeeld inhoudt dat het verschil in schade kleiner is dan 20%. Dit is conform de methode die is toegepast in VNK2.
2. Het maken van overstromingsberekeningen voor een breslocatie in dit tracé om de waterdieptes in de polder te bepalen (alleen van toepassing indien SSM wordt gebruikt). Hierbij zijn verschillende detailniveaus mogelijk: van eenvoudige projectie van het toetspeil op het achterliggende gebied tot volledige tijdsafhankelijke overstromingsmodellen. Afhankelijk van de situatie dient het geschikte detailniveau te worden gekozen.

3. Bepalen van de gevolgen bij de berekende overstroming. De gevolgenbepaling dient plaats te vinden voor verschillende belastingsituaties:
 - Hoog water
 - Droogte
 - Storm (alleen relevant bij regionale keringen langs meren)

Het hoogste schadebedrag van de afzonderlijke belastingsituaties is maatgevend, en wordt meegenomen in de normstelling. Over het algemeen kan worden gesteld dat belastingsituatie hoog water doorgaans maatgevend is. Het ligt daarom voor de hand de gevolgen eerst voor deze situatie te beschouwen, en vervolgens te beschouwen of een van de andere belastingsituaties kan leiden tot een hoger schadebedrag.

Het globale stappenplan voor de gevolgenbepaling (stap 3) hierboven, is als volgt:

- a. Bepalen van het minimale schadebedrag met behulp van een schademodel (SSM of Waterschadeschatter). Dit schadebedrag geldt als referentie voor de overige stappen (vooral d).
- b. Bepalen van het aantal slachtoffers - indien relevant - in het overstroomde gebied (gebied A) met SSM⁵. Indien het aantal slachtoffers kleiner is dan 5, hoeven slachtoffers niet te worden opgenomen in de totale gevolgen en dus ook niet in de normstelling. Voor achtergrondinformatie bij dit uitgangspunt, zie tekstbox A⁶. Uitgangspunt is dat in naastgelegen gebieden (B) en boezemstelsel (C) geen slachtoffers vallen.
- c. Bepalen van het aantal getroffen en in het overstroomde gebied (gebied A). Als standaard uitgangspunt kan worden gehanteerd dat het aantal getroffen in gebied A gelijk is aan het aantal inwoners. Dit zijn de personen die last krijgen van natte voeten. Indien bijzondere gebouwen en voorzieningen in gebied A ertoe kunnen leiden dat tijdens een doorbraak significant meer personen aanwezig zijn in het overstroomde gebied, kan dit reden zijn uit te gaan van meer getroffen dan enkel het aantal inwoners. Ook in gebieden B en C kan sprake zijn van getroffen. Zij krijgen niet zozeer last van natte voeten, maar kunnen hinder ondervinden van uitval van vitale infrastructuur en voorzieningen door de overstroming in gebied A.
- d. Controle op aanvullende gevolgen en schadeposten (schade die niet in de schademodellen zit). Indien de verwachting is dat aanvullende schadeposten significant zijn – d.w.z. dat de som van de aanvullende posten minimaal even groot is als het schadebedrag dat volgt uit de schademodellen (referentie), en daarmee leidt tot een vergroting van het schadebedrag met minimaal factor 2 - worden deze aanvullende schades in detail bepaald en gemonetariseerd, en opgenomen in het totale schadebedrag⁷. Indien dit niet het geval is, worden de aanvullende gevolgen niet in detail bepaald, maar kwalitatief bijgehouden in een lijst met 'overige gevolgen'. Deze kwalitatieve gevolgen worden weliswaar niet meegenomen in het schadebedrag dat als input geldt in de MKBA, maar kunnen wel reden zijn om op basis van bestuurlijke afweging te kiezen voor een strengere norm dan de economisch optimale overstromingskans.

Ad. b. Voor slachtofferbepaling in SSM zijn relatief uitgebreide overstromingsberekeningen nodig, waarin ook de stroomsnelheid wordt meegenomen. Indien vooraf al gesteld kan worden dat in een gebied geen slachtoffers zullen vallen (of in ieder geval minder dan 5), bestaat de mogelijkheid om

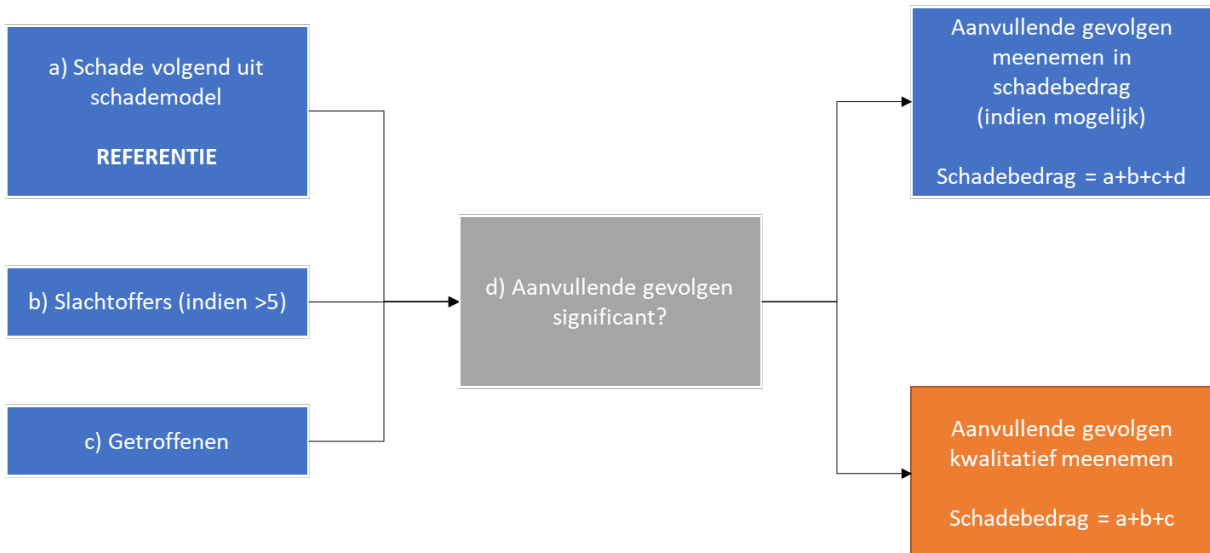
⁵ Bepalen van het aantal slachtoffers is niet mogelijk met de Waterschadeschatter.

⁶ Deze werkwijze voor slachtoffers, met o.a. de grenswaarde van 5, gold als uitgangspunt bij de uitwerking van de pilots. Dit is echter nog geen vastgestelde werkwijze, en betreft enkel een advies voor een later te nemen besluit.

⁷ Indien dit redelijkerwijs mogelijk is. Zo niet, wordt de schade kwalitatief meegenomen.

te rekenen met minder uitgebreide overstromingsberekeningen, zonder het meenemen van stroomsnelheid. Deze berekeningen volstaan immers voor de overige schades, waarvoor alleen de waterdiepte van belang is.

In Figuur 2-5 is bovenstaande uitgewerkt in een schema.



Figuur 2-5: Schema gevolgebepaling

Tekstbox A

In het geval van een doorbraak van een regionale kering zijn hoge stijg- en stroomsnelheden van water vaak niet aan de orde, en juist deze hoge stijg- en stroomsnelheden zorgen doorgaans voor slachtoffers. Daarnaast zijn de waterdieptes vaak beperkt, waardoor in de meeste gevallen nauwelijks tot geen slachtoffers vallen. Uitzonderingen hierop zijn gevallen waar grotere waterdieptes kunnen voorkomen, van meer dan 1,5m, en waar bij de overstroming nog mensen in het gebied zijn.

De slachtofferfuncties in SSM die horen bij lage stijg- en stroomsnelheden zijn omgeven door grote onzekerheid. Daarnaast geeft de schematisatie van de locaties waar zich mensen bevinden onzekerheid. Daarom is hier een aantal van 5 slachtoffers beschouwd als ondergrens voor een betrouwbare uitkomst, omdat bij een lager aantal onzekerheden en toevalligheden de uitkomst domineren. De ondergrens van 5 slachtoffers betreft een advies, voor een later te nemen besluit.

We kunnen de aanvullende gevolgen (blok d in Figuur 2-5) onderverdelen in drie categorieën: d.1 Aanvullende schade in het overstroomde gebied (gebied A), die niet is meegenomen in de referentieschade (volgend uit het schademodel).

d.2 Schade in naastgelegen gebieden (B), als gevolg van de overstroming in gebied A.

d.3 Schade aan boezem en boezemland (C)

Deze drie categorieën zijn hieronder verder uitgewerkt.

d.1. Aanvullende schade in het overstroomde gebied (gebied A)

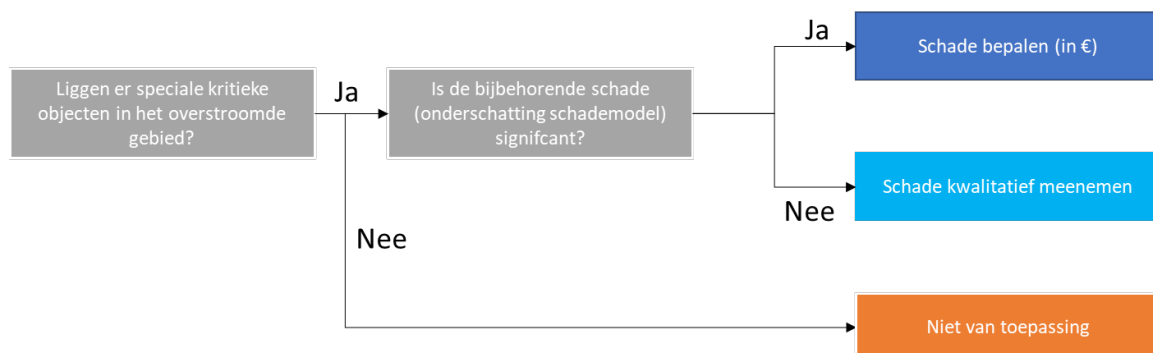
Zoals eerder vermeld, wordt de schade in het overstroomde gebied in eerste instantie berekend met een schademodel (de referentieschade). Het schademodel geeft voor de meeste schadeposten realistische inschattingen. Voor kritieke objecten kan een schademodel echter tot onderschatting leiden (zoals eerder beschreven in paragraaf 2.3.1).

Als kritieke objecten onderscheiden we:

- Vitale infrastructuur
- Kwetsbare objecten (ziekenhuizen, scholen)
- Risicolocaties voor milieu
- Door KRW (kaderrichtlijn water) beschermde gebieden
- Rijksmonumenten of cultureel erfgoed

Een schademodel gaat uit van gemiddeldes, en zal voor bijvoorbeeld een ziekenhuis in het overstroomde gebied een gemiddelde schade tellen. Wanneer er in het gebied echter bepaalde specials liggen (in een van bovenstaande categorieën), zoals een ziekenhuis significant groter dan gemiddeld (bijv. Erasmus MC) of een bepaalde risicolocatie voor milieu, zullen de schades die volgen uit het schademodel een onderschatting zijn. Deze onderschatting kan als aanvullende schade in het overstroomde gebied (d.1) worden meegenomen, en is als het ware een correctie op het schadebedrag volgend uit het schademodel. Deze correctie hoeft alleen te worden toegepast als schadepost d.1 significant is. Dit is het geval wanneer de schadepost (naar verwachting) een significant deel van de referentieschade bedraagt, en daardoor ertoe kan bijdragen dat de aanvullende schadeposten (d.1, d.2 en d.3) cumulatief minstens zo groot zijn als de referentieschade. Als er wel sprake is van een schadepost d.1, maar deze (naar verwachting) niet significant is conform bovenstaande definitie, wordt de post kwalitatief opgenomen in een lijst 'overige schades'.

Figuur 2-6 toont het schematische stappenplan horende bij schadepost d.1.



Figuur 2-6: Stappenplan schadepost d.1

We merken op dat de schade enkel in euro's wordt bepaald als dit redelijkerwijs mogelijk is. Als dit niet het geval is, wordt de schade kwalitatief bepaald. Dit geldt ook voor de hiernavolgende figuren in deze paragraaf.

d.2. Schade in naastgelegen gebieden (B)

Aanvullende schade in naastgelegen gebieden bestaat uit:

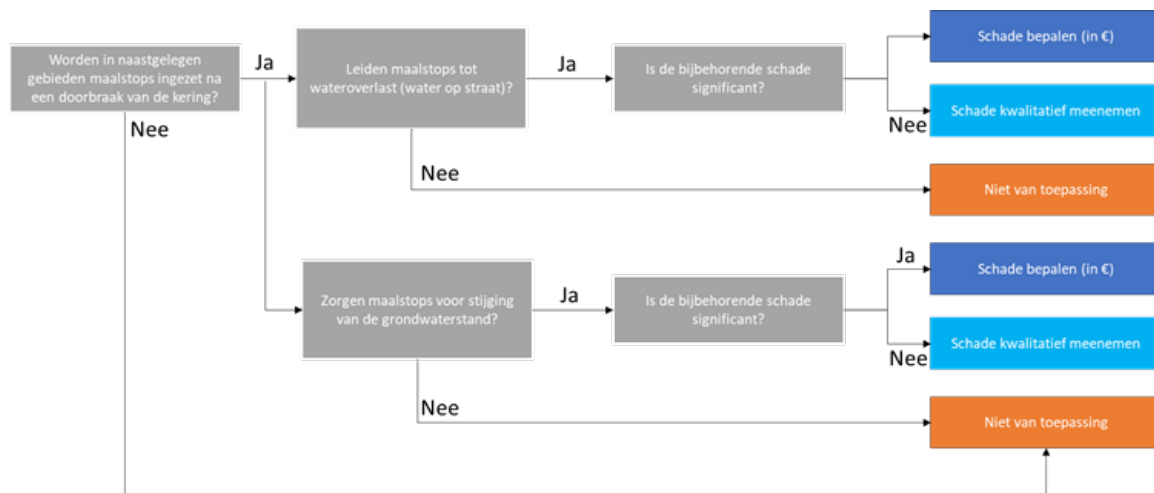
- Schade door uitval (vitale) infrastructuur in het overstroomde gebied; hierbij is de duur en de schaal van de uitval van belang.
- Schade door maalstops (water op straat in naastgelegen gebieden, stijging grondwaterstand).

Ook voor schadepost d.2 geldt dat deze alleen in detail hoeft te worden bepaald en meegenomen in het schadebedrag, als de schadepost significant is (vergelijkbaar met schadepost d.1). Als de schadepost niet significant is, wordt deze kwalitatief opgenomen in de lijst 'overige schades'.

De bijbehorende stappenplannen voor schadepost d.2 zien er uit zoals getoond in Figuur 2-7 en Figuur 2-8.



Figuur 2-7: Stappenplan vitale infrastructuur (d.2)



Figuur 2-8: Stappenplan maalstops (d.2)

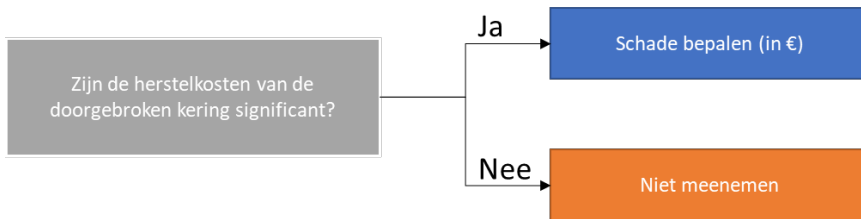
d.3. Schade aan boezem en boezemland

Schade aan boezem en boezemland bestaat uit:

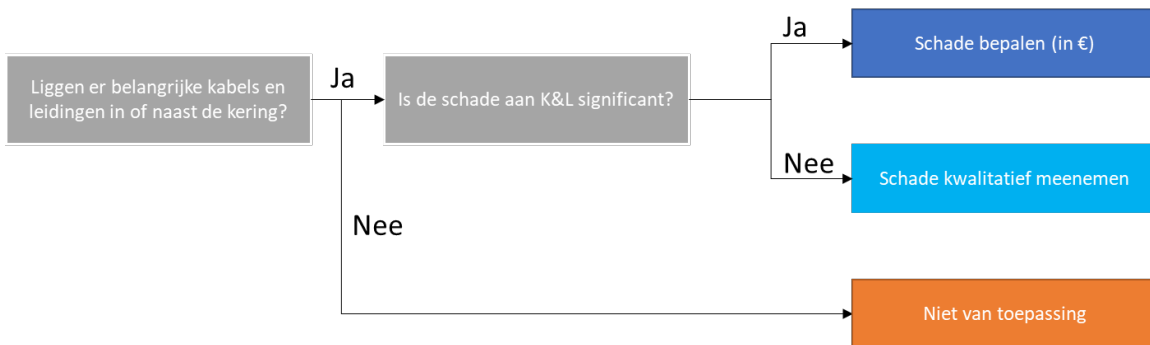
- Herstelkosten van de doorgebroken kering
- Schade aan kabels en leidingen in of naast de kering
- Schade aan taluds als gevolg van waterstandsval
- Uitval gebruiksfuncties, zoals scheepvaart, koelwater, afvoer rioolwaterzuivering.

Ook voor schadepost d.3 geldt dat deze alleen in detail hoeft te worden bepaald en meegenomen in het schadebedrag, als de schadepost significant is (vergelijkbaar met schadepost d.1 en d.2). Als de schadepost niet significant is, wordt deze kwalitatief opgenomen in de lijst 'overige schades'.

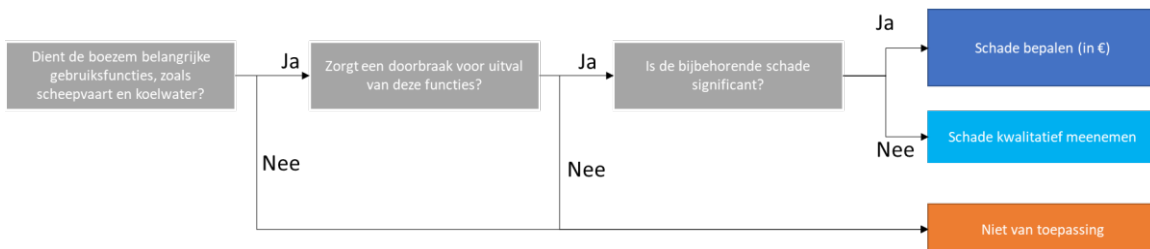
De bijbehorende stappenplannen zijn getoond in Figuur 2-9 t/m Figuur 2-12.



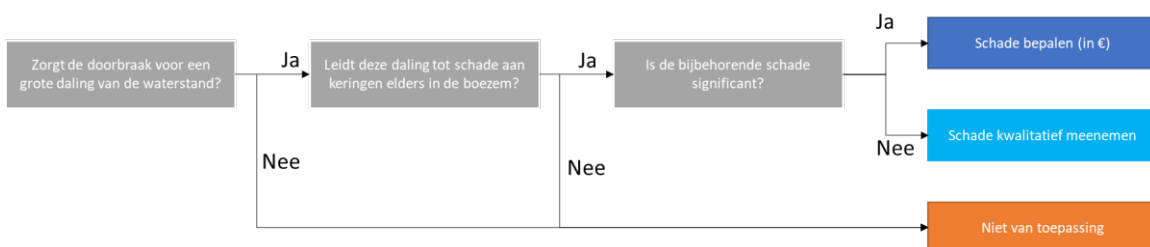
Figuur 2-9: Stappenplan herstelkosten kering (d.3)



Figuur 2-10: Stappenplan kabels en leidingen (d.3)



Figuur 2-11: Stappenplan gebruiksfuncties boezem (d.3)



Figuur 2-12: Stappenplan waterstandsding (d.3)

d. Totaal schadepost d

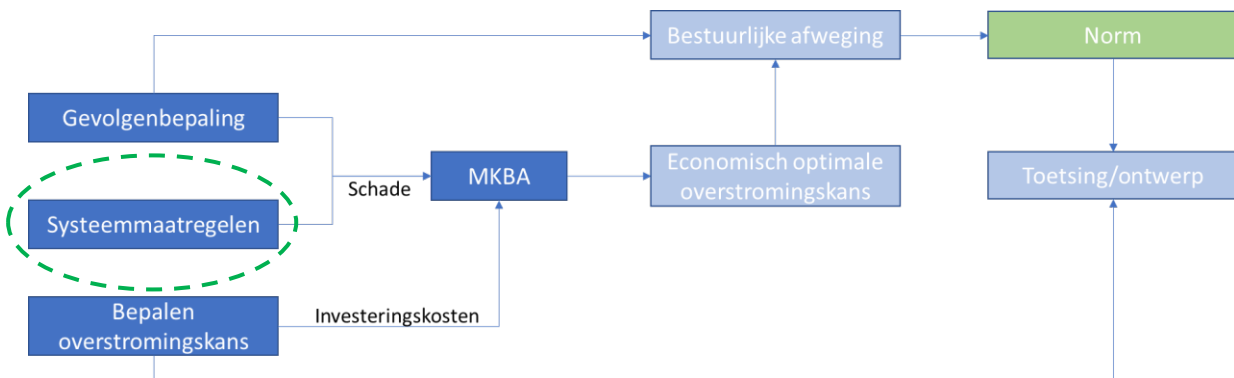
De significante schadeposten uit d.1, d.2 en d.3 die zijn gemonetariseerd, worden opgenomen in het totale schadebedrag. Schadeposten die niet zijn gemonetariseerd (ofwel omdat ze niet significant zijn conform de in deze paragraaf gehanteerde definitie, ofwel omdat het niet redelijkerwijs mogelijk is de schade te monetariseren) worden niet opgenomen in het schadebedrag, maar kwalitatief opgenomen in de lijst met 'overige gevolgen'. Deze kwalitatieve gevolgen kunnen reden zijn om in een bestuurlijke afweging te kiezen voor een strengere norm dan de economisch optimale overstromingskans die volgt uit een MKBA.

3 Systemmaatregelen

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk komen systeemmaatregelen aan bod. Dit zijn gevolgbeperkende maatregelen aan het boezemstelsel of in het achterland, die kunnen worden ingezet bij dreigende hoogwatersituaties (preventief) of bij een doorbraak van een kering (reactief).

Figuur 3-1 illustreert de rol van systeemmaatregelen binnen de veiligheidsbenadering. Systeemmaatregelen kunnen de gevolgen van een kering doorbraak, en daarmee de gevolgschade, beperken. De resulterende gevolgschade dient als input voor de MKBA, waaruit de economisch optimale overstromingskans volgt.



Figuur 3-1: Rol van systeemmaatregelen binnen de veiligheidsbenadering

In paragraaf 3.2 worden eerst enkele richtinggevende principes bij systeemmaatregelen gegeven. Paragraaf 3.3 bevat een tabel waarin verschillende mogelijke systeemmaatregelen worden beschreven, inclusief de bijbehorende positieve invloed op de gevolgschade (schadereductie) en eventuele negatieve invloed (extra schade). Tot slot geeft de tabel voor alle systeemmaatregelen enkele overwegingen voor het wel of niet inzetten van de betreffende maatregel.

3.2 Richtinggevende principes

Hieronder volgen enkele richtinggevende principes om rekening mee te houden met betrekking tot systeemmaatregelen:

- De lijst met systeemmaatregelen in paragraaf 3.3 is niet uitputtend. Voor specifieke situaties zijn mogelijk aanvullende maatregelen te bedenken.
- We maken onderscheid tussen twee soorten systeemmaatregelen. De eerste zijn beheerkeuzes die gemaakt kunnen worden voor of tijdens een overstroming, met het huidige watersysteem als uitgangspunt (zoals het inzetten van maalstops of het dichtten van duikers in het beschermde gebied). De tweede zijn systeemingenrepen, waarbij het watersysteem wordt aangepast (zoals het aanleggen van overlaatgebieden of het vergroten van gemaalcapaciteit).
- Daarnaast maken we onderscheid in de locatie waar de systeemmaatregelen worden getroffen: in het watersysteem (bijvoorbeeld het aanleggen/inzetten van overlaatgebieden) of in het beschermde gebied (bijvoorbeeld het dichtten van duikers in het beschermde gebied).

- Het primaire doel van het inzetten van systeemmaatregelen is het reduceren van de gevolgen bij een kering doorbraak. Deze schadereductie is doorgaans gericht op het gebied achter de kering dat overstroomt (gebied A in hoofdstuk 2). Daartegenover staat dat sommige systeemmaatregelen juist leiden tot extra schade aan omliggende polders (gebied B) of het boezemstelsel (gebied C).
- Op basis van de kenmerken van een gebied en watersysteem en de kenmerken van de verschillende systeemmaatregelen is vaak al een eerste inschatting te maken welke systeemmaatregelen mogelijk zinvol zijn voor een bepaald dijktraject.
- Voor systeemmaatregelen met een (naar verwachting) significante invloed op de gevolgschade (minimaal factor 2 reductie van de gevolgschade, overeenkomstig met significante aanvullende gevolgen in hoofdstuk 2), is het zinvol de maatregel te kwantificeren (schadereductie gebied A, mogelijke extra schade gebieden B en C, en de kosten van de maatregel zelf) en mee te nemen in de MKBA. Op die manier komt de invloed van de systeemmaatregel tot uiting in de economisch optimale overstromingskans.
- Indien een systeemmaatregel is meegenomen in de economisch optimale overstromingskans en daaropvolgend de normstelling, dient de systeemmaatregel te voldoen aan een bepaalde betrouwbaarheid (m.a.w. er dient te worden aangetoond dat de systeemmaatregel ook werkt en de gevolgen inderdaad zodanig gereduceerd kunnen worden als is meegenomen in de MKBA). Dergelijke betrouwbaarheidseisen voor systeemmaatregelen zijn nog niet vastgesteld. Dit kan op verschillende manieren worden ingericht:
 - Rekenkundige eisen, waaraan een maatregel moet worden getoetst;
 - Meer verantwoordelijkheid bij de beheerder, waarbij de beheerder zelf aannemelijk moet maken dat de systeemmaatregel werkt (verantwoordingsplicht).We merken op dat de tweede optie, een verantwoordingsplicht, meer voor de hand ligt. Dit is echter nog niet uitgewerkt in de pilots, en dient bij vaststelling van de toekomstige veiligheidsbenadering te worden ingericht.
- Indien een systeemmaatregel niet significant is voor de normstelling (niet leidt tot minimaal factor 2 schadereductie), is het niet direct zinvol de maatregel uitgebreid te kwantificeren en mee te nemen in een MKBA. Maar ook in dat geval kan het bij een daadwerkelijke kering doorbraak zinvol zijn een maatregel in te zetten, om zo alsnog de gevolgen proberen te verkleinen. Aangezien de systeemmaatregel in dat geval niet wordt meegenomen in de normstelling hoeft de betrouwbaarheid van de inzet ook niet te worden aangetoond.
- Voor de inschatting of bepaalde systeemmaatregelen zinvol zijn voor een specifiek gebied, is het van belang inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de overstroming (en bijbehorende schade) in de tijd. In de pilots wordt dit verder uitgewerkt.

In het kader van scherp toetsen en robuust ontwerpen, valt het te overwegen om systeemmaatregelen – indien relevant – alleen mee te nemen in de normstelling van de toetsnorm, om niet-doelmatige versterkingen te kunnen uitstellen. Indien een versterking nodig is, wordt de systeemmaatregel dan niet meegenomen in de ontwerpnorm, leidend tot een robuust ontwerp. Deze overweging dient te worden meegenomen in de vaststelling van de uiteindelijke veiligheidsbenadering en werkwijze.

3.3 Tabel systeemmaatregelen

Onderstaande tabel toont een lijst met mogelijke systeemmaatregelen. Per maatregel is tussen haakjes aangegeven of het een beheerkeuze of een systeemingreep betreft. Daarnaast is voor elke maatregel de werking, de positieve invloed (reductie van gevolgen in gebied A) en negatieve invloed (aanvullende schade/gevolgen in gebieden B en C) beschreven, evenals enkele overwegingen voor het wel of niet inzetten van de maatregel. Onderstaande lijst is niet uitputtend, maar beschrijft enkel de meest voorkomende maatregelen. Voor specifieke gebieden zijn mogelijk nog andere maatregelen denkbaar. In de pilots zijn verschillende systeemmaatregelen uitgewerkt.

Maatregel	Werking	Positieve invloed	Negatieve invloed	Conclusie / overweging
Compartmenteren boezem (voornamelijk beheerkeuze, wanneer vaste compartimenteringsmiddelen worden geplaatst is het een systeemingreep)	Verschillende delen (compartmenten) van een regionale waterpartij worden van elkaar gescheiden / afgesloten. Hierdoor wordt de aanvoer van water bovenstrooms gelimiteerd, hetgeen de hoeveelheid water die de achterliggende polder kan instromen bij een doorbraak verkleint. Het scheiden / afsluiten van de compartmenten kan door middel van vaste compartimenteringsmiddelen (schuiven die worden dichtgezet) of met behulp van noodmaatregelen (big-bags).	Verkleint instroom naar het achterland bij falen van een kering. Dit zorgt voor minder schade, slachtoffers en getroffen.	Vergroot de schade aan het boezemsysteem, op twee manieren: - Door het compartmenteren van de boezem treedt sneller droogval op in het compartiment waar de kering is gefaald. Dit kan leiden tot falen van het buitentalud elders in het compartiment (zie Figuur 2-5). - In de overige compartmenten kan water niet meer worden afgevoerd, waardoor hier wateroverlast in de polder kan ontstaan.	Compartmenteren van de boezem heeft vooral een positieve invloed als de instroom van water bij een kering doorbraak – en daarmee de schade - geleidelijk oploopt. Wanneer het grootste deel van het totale watervolume meteen aan het begin instroomt, komt compartmenteren vaak te laat, zeker wanneer gecompartmenteerd moet worden met noodmaatregelen. Daarnaast moet het risico op schade aan het boezemstelsel in acht worden genomen.
Compartmenteren achterland (inzetten is een beheerkeuze, aanleggen een systeemingreep)	Verschillende delen van de achterliggende polder worden van elkaar gescheiden / afgesloten door hoge lijnen (bijvoorbeeld compartimenteringskeringen en weglammen) of door het dichtzetten van duikers. Hierdoor zal bij falen van de kering niet de	Beschermt bepaalde delen van een polder bij falen van een kering tegen overstromen en de bijbehorende gevolgen.	Door het compartmenteren stijgt het water in het compartiment dat nog wél overstroomt sneller, waardoor de schade in dat gebied mogelijk groter wordt.	Compartmenteren van het achterland is vooral nuttig wanneer hiermee overstroming wordt voorkomen in compartimenten waar de gevolgen van een overstroming groot kunnen zijn, en de gevolgen

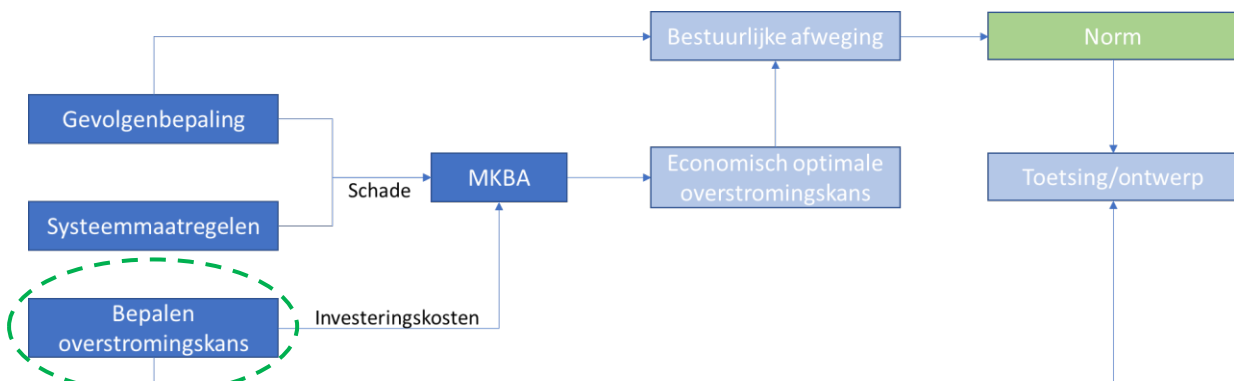
<p>Overlaatgebieden inzetten (inzet van overlaatgebieden is een beheerkeuze, aanleggen van overlaatgebieden een systeemingreep)</p>	<p>gehele polder overstromen, maar slechts het deel (compartiment) dat grenst aan de regionale waterpartij.</p>	<p>Door de gelimiteerde aanvoer van water wordt de waterstand benedenstroms van het overlaatgebied verkleind, met een lagere faalkans van de keringen tot gevolg. Bovendien wordt – in het geval van een doorbraak – de instroom van water verkleind, met minder schade, slachtoffers en getroffen en getroffen tot gevolg.</p>	<p>Waterbezwaar in het overlaatgebied brengt ook schade/kosten met zich mee (inundatieschade, leegpompen), maar die zijn waarschijnlijk lager dan elders in het gebied.</p>	<p>in het compartiment dat wel overstroomt beperkt zijn.</p>
<p>Gemaalcapaciteit vergroten (systeemingreep)</p>	<p>Overlaatgebieden zijn gebieden waar de gevolgen van een overstroming beperkt zijn, omdat ze weinig inwoners hebben en weinig economische waarde vertegenwoordigen. Bij het inzetten van overlaatgebieden wordt doelgericht een overstroming van het overlaatgebied geïnitieerd, waardoor de hoeveelheid water in de regionale waterpartij daalt, en daarmee de aanvoer van water naar benedenstroms gelegen gebieden wordt gelimiteerd.</p>	<p>Sneller leegpompen van de boezem zorgt voor lagere waterstanden op de boezem en een verkleining van de instroom van water in het geval van falen van de kering. Dit heeft dezelfde positieve gevolgen als het inzetten van overlaatgebieden.</p>	<p>De negatieve invloed van het vergroten van gemaalcapaciteit is beperkt. Wel merken we op dat het water dat uit de boezem wordt gepompt geborgen moet kunnen worden in grotere rivieren. Bovendien is het vergroten van gemaalcapaciteit duur.</p>	<p>Het vergroten van de gemaalcapaciteit is vaak te duur, en daarom alleen te overwegen wanneer de positieve gevolgen zeer groot zijn.</p>
<p>Inzetten maaltops (beheerkeuze)</p>	<p>Bij het inzetten van maaltops kunnen bepaalde polders niet meer uitwateren op de boezem, waardoor de aanvoer van water naar benedenstroms gelegen gebieden wordt gelimiteerd. Het inzetten van maaltops kan plaatsvinden na falen van een</p>	<p>Door de gelimiteerde aanvoer van water wordt de instroom van water bij een doorbraak verkleind, met minder schade, slachtoffers en getroffen tot gevolg. Wanneer een maaltop preventief wordt ingezet, kan dit ook leiden tot lagere waterstanden op de</p>	<p>Doordat bovenstroms gelegen polders niet meer kunnen uitwateren op de boezem, kan er wateroverlast in deze polders ontstaan, bijvoorbeeld door water op straat of een verhoogde grondwaterstand (met schade aan landbouw tot gevolg).</p>	<p>Inzetten van maaltops heeft vooral een positieve invloed als de instroom van water bij een kering doorbraak – en daarmee de schade – geleidelijk oploopt. Wanneer het grootste deel van het totale watervolume meteen aan het begin instroomt, komen maaltops vaak te laat.</p>

	kering of preventief (bij een verwacht hoogwater).	boezem en een lagere faalkans van de keringen.		Het is ook mogelijk preventief maalstops in te zetten, maar dit kan relatief grote negatieve gevolgen hebben (wateroverlast in bovenstroomse polders).
Dichten bres (beheerkeuze)	Deze maatregel betreft het dichten van de bres na een doorbraak, met behulp van noodmaatregelen (big-bags), waardoor de instroom van water wordt gestopt.	Het dichten van de bres zorgt voor een verkleining van de totale instroom van water, met minder schade, slachtoffers en getroffen en als gevolg.	Geen negatieve gevolgen.	Het dichten van de bres heeft vooral een positieve invloed als de instroom van water bij een kering doorbraak – en daarmee de schade - geleidelijk oploopt. Wanneer het grootste deel van het totale watervolume meteen aan het begin instroomt, is de schadereductie beperkt. Toch valt het in vrijwel alle gevallen aan te raden de bres zo snel mogelijk te dichten.

4 Bepalen overstromingskans

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk richt zich op het bepalen van de overstromingskans van een polder, beschermd door een regionale kering. Figuur 4-1 toont de rol van het bepalen van de overstromingskans binnen de veiligheidsbenadering. De bepaling van de overstromingskans speelt een rol binnen de MKBA, omdat dit informatie geeft over de omvang van maatregelen die nodig zijn om de kering te versterken tot aan een bepaalde norm (overstromingskans), en daarmee over de bijbehorende investeringskosten. Daarnaast dient het bepalen van de overstromingskans ter verificatie of aan de gestelde norm wordt voldaan, en is daarmee van belang voor toetsing en ontwerp.



Figuur 4-1: Rol van bepalen overstromingskans binnen de veiligheidsbenadering

Dit hoofdstuk beschrijft verschillende methodes die kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de overstromingskans, ofwel de betrouwbaarheid⁸ van regionale keringen. Hierbij is breder gekeken dan de vigerende toets- en beoordelingsmethodieken voor dijken in Nederland (zowel regionaal als primair), en komen ook alternatieve methodes (bijvoorbeeld uit het buitenland) aan bod. In de volgende paragrafen worden verschillende methodes globaal beschreven, inclusief voor- en nadelen, worden de verschillende methodes met elkaar vergeleken op het gebied van geschiktheid, benodigde inspanning en nauwkeurigheid, en worden eerste voorlopige conclusies getrokken ten aanzien van het gebruik van de verschillende methodes.

Dit hoofdstuk heeft gediend als een soort menukaart bij de vier pilots, waar verschillende van de beschreven methodes (passend bij de specifieke situatie) zijn toegepast. In het integrale conclusierapport (zie Tabel 1-1) zijn de conclusies ten aanzien van o.a. nauwkeurigheid en uitvoerbaarheid beschreven. Op basis van het totaal aan rapportages voor de verkenning veiligheidsbenadering regionale keringen (zie Tabel 1-1) dienen, voor de uiteindelijke vaststelling van de veiligheidsbenadering, de voorlopige conclusies uit dit hoofdstuk ten aanzien van het gebruik van verschillende methodes voor het bepalen van de overstromingskans/betrouwbaarheid verder geconcretiseerd te worden.

⁸ Met betrouwbaarheid wordt hier het veiligheidsniveau van de kering bedoeld. Hoe hoger de betrouwbaarheid, hoe lager de overstromingskans (ook wel faalkans genoemd). Maat voor de betrouwbaarheid is de betrouwbaarheidsindex β , die als volgt is gerelateerd aan de overstromingskans (Pf): $Pf = \Phi(-\beta)$, waarin Φ de standaardnormaalverdeling is.

4.2 Overzicht methodes

Tabel 4-1 toont een overzicht van verschillende methodes en technieken om de betrouwbaarheid/overstromingskans van regionale keringen te bepalen/berekenen. Deze tabel richt zich enkel op het bepalen van de betrouwbaarheid (of overstromingskans) zelf, en geeft enkel een globale beschrijving van de methodes. We merken dat de voor- en nadelen in onderstaande tabel kwalitatief ten opzichte van elkaar zijn, en geen waardeoordeel. Daarnaast merken we op dat de onderstaande methodes niet allemaal direct bruikbaar zijn, maar dat soms nog enige ontwikkeling nodig is, zoals het kalibreren van semi-probabilistische methodes (al dan niet in combinatie met bewezen sterkte) of het inrichten van methodes op basis van basisfaalkansen en likelihood ratios.

Tabel 4-1 Methodes voor het bepalen van de betrouwbaarheid van regionale keringen

Methodes	Omschrijving	Voordelen	Nadelen
Semi-probabilistische methodes	In een semi-probabilistische berekening wordt op basis van karakteristieke parameterwaarden een veiligheidsfactor berekend. Middels een set aan gekalibreerde partiële veiligheidsfactoren kan deze veiligheidsfactor worden gerelateerd aan de betrouwbaarheid (β). Dit is vergelijkbaar met de huidige beoordelingsmethodiek voor STBI.	<ul style="list-style-type: none"> - Een semi-probabilistisch format dat vergelijkbaar is met het huidige, maakt het mogelijk oude berekeningen te hergebruiken. - Relatief eenvoudige methode. 	<ul style="list-style-type: none"> - Minder nauwkeurig doordat 'bewezen sterkte' niet wordt meegenomen. In de huidige praktijk zien we vaak dat lage stabiliteits- en veiligheidsfactoren worden berekend voor keringen die er al lang liggen, zonder enige schade.
Semi-probabilistische methodes met bewezen sterkte in de kalibratie	Vergelijkbaar met bovenstaande, met als aanscherping dat in de kalibratie van de partiële veiligheidsfactoren (relatie tussen berekening en betrouwbaarheid) bewezen sterkte wordt meegenomen (in de probabilistische kalibratieberekeningen).	<ul style="list-style-type: none"> - Zelfde voordelen als bovenstaande. - Nauwkeuriger dan bovenstaande. 	<ul style="list-style-type: none"> - Kalibratie kost meer inspanning dan bovenstaande, omdat bewezen sterkte moet worden meegenomen in probabilistische kalibratieberekeningen.
Probabilistische methodes	De betrouwbaarheid van een kering wordt bepaald d.m.v. volledig probabilistische berekeningen (vaak a.d.h.v. fragility curves).	<ul style="list-style-type: none"> - Nauwkeuriger dan semi-probabilistische methodes; de betrouwbaarheid wordt niet geschat a.d.h.v. kalibraties, maar direct berekend. 	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten meer inspanning dan semi-probabilistische methodes. - Zonder bewezen sterkte zullen nog steeds hoge faalkansen worden berekend.

Methode	Omschrijving	Voordelen	Nadelen
<p>Probabilistische methodes i.c.m. bewezen sterkte</p>	<p>Vergelijkbaar met bovenstaande, met als verschil dat in de probabilistische berekeningen bewezen sterkte wordt meegenomen (reliability updating).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Zeer nauwkeurig, door het gebruik van bewezen sterkte 	<ul style="list-style-type: none"> - Methode is bewerkelijk en kost meer tijd.
<p>Basisfaalkansen en likelihood ratios (levee screening tool)</p>	<p>Een fragility curve van een kering wordt opgesteld, door basisfaalkansen aan de kering toe te kennen, en deze te vermenigvuldigen met 'scores' voor verschillende indicatoren (o.b.v. inspectie). Met deze scores wordt de basisfaalkans (en de ligging van de fragility curve) verhoogd bij aangetroffen schade, en verlaagd bij uitblijven van schade. Door de fragility curve te combineren met de kansdichtheid van de waterstand, volgt een totale faalkans/betrouwbaarheid. Deze methode is gebaseerd op de levee screening tool van USACE [USACE, 2015].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Relatief snelle, simpele methode - Maakt gebruik van waarnemingen in het veld. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grove methode, en daarmee niet heel nauwkeurig.
<p>Basisfaalkansen en likelihood ratios +</p>	<p>Uitgebreidere methode van bovenstaande. In bovenstaande methode is het opstellen van fragility curves grof en eenvoudig, op basis van enkel een basis faalkans bij een waterstand gelijk aan de kruinhoogte van de kering. In deze uitgebreidere methode wordt de fragility curve gedetailleerder bepaald. Voor verschillende configuraties (gebied, type kering, ondergrond, geometrie) kunnen middels probabilistische berekeningen fragility curves worden afgeleid. Voor de te beoordelen kering wordt vervolgens een van deze</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Zelfde voordelen als bovenstaande. - Nauwkeuriger dan bovenstaande, doordat fragility curves gedetailleerder worden afgeleid. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ontwikkeling van fragility curves voor verschillende configuraties kost tijd.

Methode	Omschrijving	Voordelen	Nadelen
	<p>curves toegepast op basis van de configuratie. Verder werkt de methode hetzelfde als bovenstaande.</p>		
<p>Expert elicitation ("Amerikaanse methode")</p>	<p>Samen met experts worden per kering gebeurtenissen-bomen ingevuld en de kansen op knopen ingeschat, ondersteund door berekeningen, modellen, lokale data, etc. (Vergelijkbaar met Deskundigen Oordeel Toets op Maat in het WBI)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Zeer nauwkeurig. 	<ul style="list-style-type: none"> - Kost veel tijd en inspanning.
<p>Toetsen op degradatie</p>	<p>Startpunt is een nulconditie / basisveiligheid. Dit is een uitspraak over de betrouwbaarheid/faalkans van de kering, op basis van:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eerdere toetsresultaten, of; - Een nieuwe faalkansberekening (die slechts eenmalig nodig is). <p>Aan de hand van gevoeligheidsanalyses worden degradatiecurves afgeleid, die aangeven hoeveel invloed degradatie heeft op de faalkans. Door vervolgens te monitoren op degradatie, en dit koppelen aan de degradatiecurves, kan de faalkans telkens worden geactualiseerd.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Relatief eenvoudige toetsing - Sluit goed aan bij waarnemingen in het veld. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bepalen van een nulconditie vereist enige inspanning. - Het is onbekend of alle mogelijke vormen van degradatie bekend zijn, en of de invloed op de kering goed gemodelleerd/bepaald kan worden.

Methode	Omschrijving	Voordelen	Nadelen
Instandhoudingsprofiel	Voor een bepaald traject (of voor een bepaalde configuratie van een kering) wordt een minimaal profiel opgesteld dat voldoende veilig is (aan een bepaalde minimale betrouwbaarheid voldoet). Een kering is voldoende betrouwbaar wanneer deze voldoet aan dit instandhoudingsprofiel. Dit profiel moet met beheer en onderhoud in stand worden gehouden.	- Eenvoudige toetsing	- Afleiden van een minimaal profiel kost, afhankelijk van de nauwkeurigheid, tijd. - Bij toetsing aan een minimaal profiel wordt geen actuele faalkans berekend, waardoor de actuele sterkte van de kering niet bekend is. Er is enkel bekend dat de kering (mits die voldoet aan het minimaal profiel) een voldoende kleine faalkans heeft.

4.3 Vergelijking methodes

Hierboven zijn verschillende methodes voor het bepalen van de betrouwbaarheid van regionale keringen uiteengezet. In deze paragraaf worden deze methodes nader met elkaar vergeleken, waarbij het geschiktheidsbereik, de nauwkeurigheid en de vereiste inspanning worden beschouwd. Dit kan als basis dienen bij de keuze van de te gebruiken methodes in de vier pilots, of later in een toetsing of ontwerp. We merken op dat de vergelijking en de voorlopige conclusies berusten op globale ervaringen.

De geschiktheid van de verschillende methodes hangt met name af van de norm (maximale overstromingskans) en van de variatie in de waterstand. Figuur 4-2 geeft een globaal schematisch overzicht van het bereik in norm en waterstandsvariatie waarvoor de verschillende methodes geschikt zijn⁹. De uitleg hierbij is als volgt:

- De methodes met 'basisfaalkansen en likelihood ratios' en 'toetsen op degradatie' leunen voor een groot deel op bewezen sterkte en inspecties. Dit soort methodes is vooral geschikt wanneer de te toetsen situatie dicht bij de dagelijkse situatie ligt. Immers, in dat geval zegt de bewezen sterkte van situaties die al zijn opgetreden (en vaak in de buurt van de dagelijkse situatie liggen) meer over de veiligheid van de kering ten opzichte van de norm. Dit is het geval bij een soepele norm (met lage terugkeertijd) of bij een kleine variatie in de buitenwaterstand, omdat in beide gevallen de te toetsen situatie (normsituatie/design point) relatief dicht bij de dagelijkse situatie ligt.
- Bij een hogere norm of grotere variatie in de buitenwaterstand ligt de te toetsen situatie (normsituatie/design point) verder van de dagelijkse situatie af. De kans dat de te toetsen

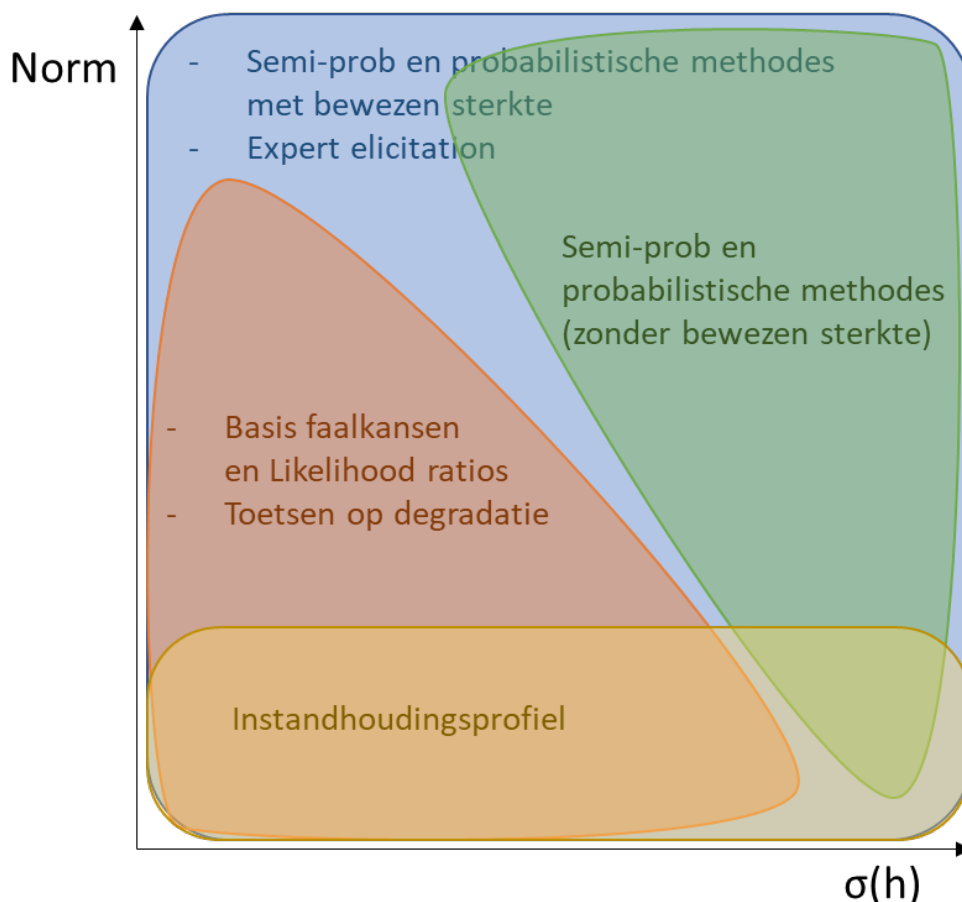
⁹ Merk op dat deze figuur puur illustratief is, en geen formele status heeft

situatie al eens is opgetreden wordt kleiner, waardoor bewezen sterkte op basis van historische gebeurtenissen minder zegt over de veiligheid van de kering ten opzichte van de norm.

In dat geval zeggen voorspellende modellen, zoals semi-probabilistische en probabilistische berekeningen, meer over de veiligheid dan historische gebeurtenissen.

Aan de andere kant blijken deze voorspellende modellen relatief onnauwkeurig wanneer deze niet gecombineerd worden met bewezen sterkte. In de range waar bewezen sterkte relevant is (bij lage norm en weinig variatie in de buitenwaterstand), is het dan ook aan te raden voorspellende modellen te gebruiken met toepassing van bewezen sterkte.

- Voorspellende modellen (semi-probabilistische en probabilistische berekeningen) gecombineerd met bewezen sterkte zijn geschikt in het gehele bereik van normen en variatie in waterstand. Probabilistische methodes gecombineerd met bewezen sterkte zijn het meest betrouwbaar. Voorspellende modellen met bewezen sterkte kosten echter ook veel inspanning. Het is daarom aan te raden telkens een afweging te maken of deze modellen nodig zijn om het gewenste resultaat te halen. Het ligt bijvoorbeeld voor de hand deze modellen enkel te gebruiken in een soort Toets op Maat, of als controleberekening.
- Voor methodes op basis van 'expert elicitation' geldt hetzelfde als voor voorspellende modellen met bewezen sterkte.
- Tot slot is er de methode van beoordelen op basis van een instandhoudingsprofiel. Bij deze methode leunt de veiligheid van de kering sterk op dagelijks beheer en onderhoud. Beheer en onderhoud zijn er immers verantwoordelijk voor dat de kering aan het instandhoudingsprofiel blijft voldoen. Het ligt voor de hand dergelijke methoden vooral toe te passen bij keringen met een relatief lage norm (lees: relatief hoge maximale overstromingskans), waar de gevolgen van een overstroming relatief klein zijn.



Figuur 4-2: Geschiktheid verschillende methodes (x-as: variatie waterstand, y-as: terugkeertijd norm)

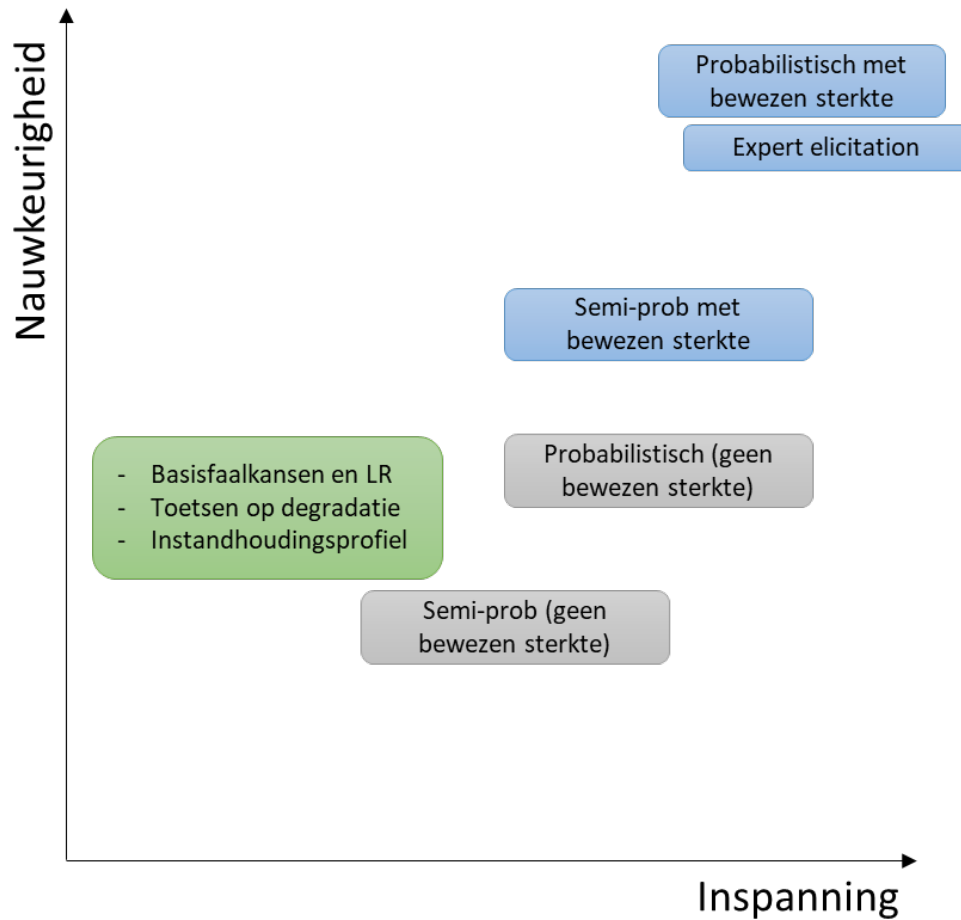
Figuur 4-3¹⁰ toont voor de verschillende methodes schematisch de nauwkeurigheid ten opzichte van de vereiste inspanning. De methodes die voornamelijk berusten op bewezen sterkte en inspectie zijn groen weergegeven, de voorspellende modellen zijn grijs, de methodes die bestaan uit een combinatie van beiden blauw. Enkele opmerkingen bij de figuur:

- Een beoordeling op basis van probabilistische berekeningen, gevoed met zoveel mogelijk informatie (waaronder bewezen sterkte) is het meest nauwkeurig. Ze gebruiken dezelfde voorspellende modellen als de huidige toetsmethodiek, maar kosten relatief veel inspanning.
- Indien goede modellen ontbreken, is een beoordeling op basis van expert elicitation een 'second best'. De nauwkeurigheid van expert elicitation beoordelingen, indien goed uitgevoerd, is hoog, door het feit dat kennis van experts wordt gecombineerd met benodigde data, modellen etc. Als voorspellende modellen (probabilistisch) slechts een deel van het faalproces beschrijven, dan is een combinatie van deze modellen en expert elicitation het meest nauwkeurig, waarbij expert elicitation de gaten in de modellering dicht.
- Semi-probabilistische methodes, waarbij bewezen sterkte is ingebracht in de kalibratie, zijn minder nauwkeurig dan probabilistische berekeningen met bewezen sterkte, en nauwkeuriger dan semi-probabilistische berekeningen waarbij geen bewezen sterkte is ingebracht. De inspanning tijdens toetsing is relatief laag (vergelijkbaar met standaard semi-probabilistische berekeningen) maar de kalibratie van partiële factoren – rekening houdend met bewezen sterkte – kost meer tijd (ontwikkeling van het instrumentarium), waardoor de inspanning in de figuur toch hoger is ingeschat.
- De methodes die weinig gebruik maken van voorspellende modellen, maar vooral zijn gericht op bewezen sterkte en inspectie (groen in de figuur), zijn relatief grof en eenvoudig, en vergen daardoor slechts weinig inspanning. Ze zijn ook niet heel nauwkeurig, maar omdat ze gebruik maken van bewezen sterkte en inspectie, sluiten ze beter aan bij de werkelijkheid in het veld dan standaard voorspellende modellen waarin de bewezen sterkte niet wordt beschouwd (grijs in de figuur).

Voor de methode 'instandhoudingsprofiel' is de vereiste inspanning in de figuur gelijk ingeschat als de inspanning voor de overige methodes gericht op bewezen sterkte en inspectie. De toetsing aan de hand van een instandhoudingsprofiel kost namelijk ook heel weinig inspanning. Wel moet in acht genomen worden dat het opstellen van instandhoudingsprofielen wel de nodige inspanning kost, afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid.

- De standaard voorspellende modellen zonder bewezen sterkte (grijs in de figuur) scoren wat betreft betrouwbaarheid wat lager dan de methodes gericht op bewezen sterkte en inspectie (groen in de figuur). Bovendien kosten ze meer inspanning. Voor situaties met een relatief lage norm en/of weinig variatie in buitenwaterstand ligt het dan ook niet voor de hand om standaard voorspellende modellen te gebruiken (zie Figuur 4-2). Bij een hogere norm en/of grotere variatie in buitenwaterstand zijn de methodes gericht op bewezen sterkte en inspectie minder relevant, en zullen de standaard voorspellende modellen eerder gebruikt worden (bij voorkeur wel met toepassing van bewezen sterkte).

¹⁰ Merk op dat deze figuur puur illustratief is, en geen formele status heeft



Figuur 4-3: Nauwkeurigheid vs. benodigde inspanning van de verschillende methodes

De meest geschikte methode voor het bepalen van de betrouwbaarheid (in de pilots, of in een toets- of ontwerpsituatie) kan per situatie bepaald worden op basis van de norm, de variatie van de waterstand, en de vereiste nauwkeurigheid. Figuur 4-2 en Figuur 4-3 kunnen hierbij helpen. Doorgaans zal de keuze vallen op de methode waarbij de minste inspanning benodigd is, maar waarmee wel de vereiste nauwkeurigheid wordt behaald.

Op basis van deze paragraaf kunnen enkele eerste voorzichtige conclusies worden getrokken:

- Probabilistische berekeningen met bewezen sterkte en expert elicitation methodes zijn weliswaar het meest nauwkeurig, maar vergen ook veruit de meeste inspanning. Het ligt daarom voor de hand om te kiezen voor een 'grof naar fijn' methode. In een eerste stap wordt dan beoordeeld op basis van grovere methodes, met een lagere nauwkeurigheid maar ook minder inspanning. Indien dit leidt tot een voldoende oordeel, is de bereikte nauwkeurigheid voldoende. Indien dit leidt tot een onvoldoende oordeel, is een hogere nauwkeurigheid (en minder conservatisme) gewenst, en kunnen probabilistische berekeningen met bewezen sterkte of expert elicitation worden gebruikt in een 'Toets op Maat'¹¹.
- Een andere optie is om eerst een screening uit te voeren, waarin op basis van eerdere toetsresultaten de maatgevende faalmechanismen en maatgevende doorsnedes worden bepaald. Vervolgens worden alleen deze faalmechanismen en doorsnedes gedetailleerd beschouwd.

¹¹ Ook wanneer het vanuit het oogpunt van de toetsing niet per se nodig om probabilistische berekeningen met bewezen sterkte uit te voeren, valt aan te bevelen om deze toch steekproefsgewijs in te zetten als controleberekeningen.

- Welk soort methode wordt gekozen voor de eerste (grovere) stap (zoals hierboven beschreven) hangt af van de norm en de variatie van de waterstand. Bij een lage norm en/of weinig variatie in de waterstand, zijn methodes gericht op bewezen sterkte en inspectie ('basisfaalkansen en likelihood ratios' en 'toetsen op degradatie') geschikt. Bij hogere norm en/of meer variatie in de waterstand zijn standaard voorspellende methodes (zonder bewezen sterkte) geschikter, waarbij – vanwege de beperktere inspanning – semi-probabilistische berekeningen meestal de voorkeur zullen krijgen boven probabilistische berekeningen.
- Semi-probabilistische berekeningen met bewezen sterkte kosten tijdens de beoordeling niet meer inspanning dan semi-probabilistische berekeningen zonder bewezen sterkte, terwijl ze wel leiden tot een hogere nauwkeurigheid. De bewezen sterkte wordt namelijk meegenomen in het afleiden van de schadefactor. Afhankelijk van de vereiste (ontwikkelings-)inspanning tijdens de kalibratie, kunnen semi-probabilistische berekeningen met bewezen sterkte een goed alternatief zijn voor standaard semi-probabilistische berekeningen, met vergelijkbare inspanning tijdens toetsing en een hogere nauwkeurigheid.

We merken op dat dit slechts eerste conclusies zijn. Bij het vaststellen van de definitieve veiligheidsbenadering en werkwijze dienen deze conclusies te worden herzien en waar nodig geconcretiseerd, op basis van het totaal aan rapportages voor de verkenning veiligheidsbenadering (zie Tabel 1-1). Hierbij kunnen verschillende mogelijke hiërarchieën van methodes (grof-naar-fijn) worden gedefinieerd, waarbij het dan van de situatie afhangt welke het meest geschikt is. Daarnaast kan bij het vaststellen van de definitieve veiligheidsbenadering besloten worden tot eventuele (verdere) ontwikkeling van methodes waar dit nodig en bovendien gewenst is. Tot slot merken we op dat veel staat of valt met de invoer; bij een onnauwkeurige schematisatie is ook de beste methode onbetrouwbaar.

4.4 Doorsnede- versus trajectniveau

De methodes die hierboven zijn beschreven richten zich op het bepalen van de overstromingskans/betrouwbaarheid voor een specifiek faalmechanisme voor een specifieke doorsnede (doorsnedeniveau)¹². De norm wordt binnen een overstromingskansnorm echter gegeven als maximale overstromingskans voor een polder of regionaal dijktraject, en geldt daarom voor alle doorsnedes en alle faalmechanismen gecombineerd. De betrouwbaarheid (of overstromingskans) per doorsnede en per faalmechanisme en de maximaal toelaatbare overstromingskans voor de gehele polder moeten bij elkaar gebracht worden om ze te kunnen vergelijken. Dit kan zowel top-down als bottom-up:

- Top-down: de maximaal toelaatbare overstromingskans voor de gehele polder wordt verdeeld over de verschillende faalmechanismen met een faalkansbegroting¹³, en vervolgens verdeeld over de doorsnedes met lengte-effectfactoren. Zo ontstaat een overstromingskansseis (faalkanseis van de kering) op doorsnedeniveau (per faalmechanisme), die per doorsnede (en per faalmechanisme) kan worden vergeleken met de berekende overstromingskans (faalkans). Deze werkwijze is vergelijkbaar met het WBI bij primaire keringen. Door het werken met faalkansbegrotingen en lengte-effectfactoren is het een relatief eenvoudig toe te passen werkwijze. De werkwijze is echter grof en daardoor minder nauwkeurig, doordat aannames gedaan worden over de bijdrage van de verschillende faalmechanismen aan de totale faalkans, en over de invloed van het lengte-effect.

¹² Met uitzondering van het instandhoudingsprofiel, dat idealiter wordt bepaald voor de combinatie van alle faalmechanismen.

¹³ Aanvullend op de mechanismen zoals we die bij primaire keringen kennen, kunnen regionale keringen ook falen door droogte

- Bottom-up: de berekende overstromingskansen (faalkansen) per faalmechanisme en per doorsnede worden, rekening houdend met onderlinge correlaties, gecombineerd tot een totale overstromingskans voor de gehele polder. Deze kan vervolgens vergeleken worden met de maximaal toelaatbare overstromingskans. Deze methode is complexer dan de top-down methode, maar is in mindere mate gebaseerd op aannames en daardoor nauwkeuriger.

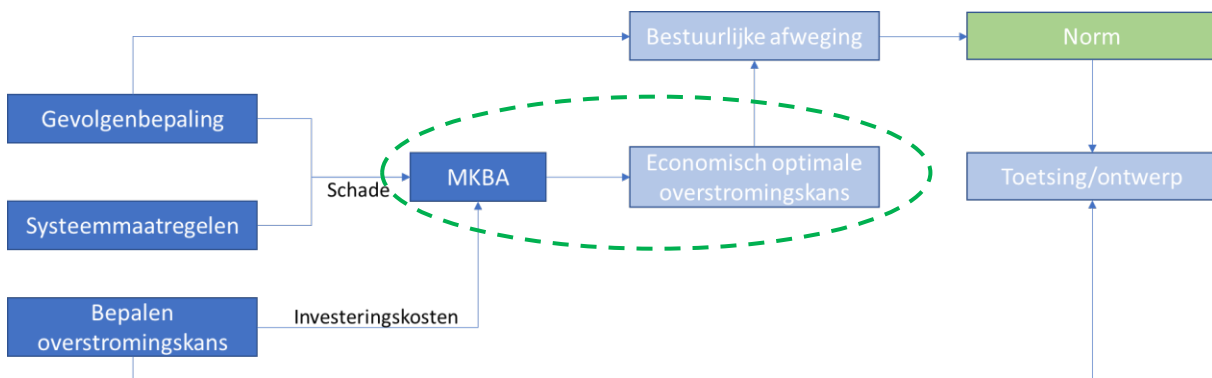
Deze methodes zijn in de pilots niet expliciet uitgewerkt. Verdere uitwerking komt aan bod in de impactanalyse (zie Tabel 1-1). Bij het vaststellen van de uiteindelijke veiligheidsfilosofie en werkwijze, dient voor een van beide methodes gekozen te worden.

5 MKBA

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk richt zich op het bepalen van de economisch optimale overstromingskans aan de hand van een MKBA (maatschappelijke kosten-batenanalyse). Enkele richtinggevende principes worden besproken, zowel specifiek voor de uitvoering van een MKBA, als voor de normering van regionale keringen in het algemeen.

Figuur 5-1 illustreert de rol van de MKBA in de veiligheidsbenadering. Op basis van de gevolgschade en de investeringskosten voor versterking (als input) kan in een MKBA de economisch optimale overstromingskans worden bepaald. Het vaststellen van de norm (maximaal toelaatbare overstromingskans) is uiteindelijk een bestuurlijke afweging. Vaak dient de economisch optimale overstromingskans hiervoor als basis, aangevuld met mogelijke overige overwegingen (bijvoorbeeld gevolgen van een overstroming die bestuurlijk gevoelig liggen en die men daarom wil voorkomen, waardoor voor een strengere norm wordt gekozen dan de economisch optimale overstromingskans).



Figuur 5-1: Rol van de MKBA in de veiligheidsbenadering.

5.2 Richtinggevende principes

Hieronder volgen enkele richtinggevende principes bij het uitvoeren van een MKBA en bij de normering van regionale keringen in het algemeen:

- Een norm is altijd een bestuurlijke keuze. Uit een MKBA volgt enkel een economisch optimale overstromingskans. In een bestuurlijke afweging wordt vervolgens bepaald of deze economisch optimale kans als norm wordt gesteld, of dat een strengere norm op zijn plaats is, bijvoorbeeld bij grote 'overige' ongewenste gevolgen van een overstroming, die niet eenvoudig in een schadebedrag zijn uit te drukken (en kwalitatief worden meegenomen, zie ook hoofdstuk 2).
- In de vier pilots is als uitgangspunt gehanteerd dat de norm wordt bepaald middels een MKBA. Voor het toekomstige normeren van regionale keringen is het echter niet per definitie nodig om voor elke polder of elk dijktraject een MKBA uit te voeren. Het is ook mogelijk om op basis van MKBA's van enkele casussen een relatie af te leiden tussen schadebedrag en economisch optimale overstromingskans, ofwel het acceptabele schadebedrag bij verschillende normen. Op deze manier kan bij de berekende gevolgschade direct de optimale overstromingskansnorm worden afgelezen. Een dergelijke relatie is ook opgesteld voor de huidige IPO-normering.

Hierbij is het waarschijnlijk wel nuttig te differentiëren naar type kering, om onderscheid te maken tussen bijvoorbeeld boezemkades en keringen langs regionale rivieren. Ook wanneer een dergelijke werkwijze (met acceptabel schadebedrag) wordt gevolgd, is uiteindelijke vaststelling van de norm een bestuurlijke keuze.

- Bij het uitvoeren van een MKBA is het voor boezemkades vaak voldoende om te werken met één overstromingsscenario, bij een maatgevende situatie. Vanwege de lage waterstandsvariaties zal er weinig verschil zijn in overstromings- en schadebeelden bij verschillende terugkeertijden (verschillende boezemwaterstanden). Het schadebedrag is in dat geval onafhankelijk van de terugkeertijd. Bij regionale rivieren ligt dit anders, aangezien de waterstandsvariaties groter zijn. Bij regionale rivieren verdient het daarom aanbeveling om te werken met verschillende overstromingsscenario's, bij verschillende terugkeertijden.
- Het verdient aanbeveling te onderzoeken of het zinvol is te werken met afzonderlijke toetsnorm en ontwerpnorm. De toetsnorm bepaalt in dat geval wanneer een kering versterkt moet worden (wanneer de overstromingskans groter is dan de toetsnorm) en de ontwerpnorm bepaalt op welke norm (overstromingskans) een kering ontworpen dient te worden, gegeven dat een versterking nodig is.
- Indien er een sprong/discontinuïteit in de kosten van de versterking zit, dient dit te worden meegenomen in de MKBA. Bijvoorbeeld als het vanwege ruimtegebrek niet mogelijk is oneindig te blijven versterken in de vorm van een groene kering, dient dit mee te worden genomen in de investeringskosten van de MKBA. In de investeringskosten wordt dan vanaf een bepaalde norm rekening gehouden met andere – vaak duurdere - maatregelen (bijvoorbeeld damwanden).

Merk op dat een aantal van bovenstaande punten nog niet zijn uitgewerkt, en dat hier nog keuzes in gemaakt dienen te worden (bijvoorbeeld het uitvoeren van een MKBA of het gebruik van een acceptabel schadebedrag ter bepaling van de economisch optimale overstromingskans, of het wel of niet toepassen van verschillende normen voor toets en ontwerp). Deze keuzes dienen gemaakt te worden bij het definitief vaststellen van de veiligheidsbenadering en bijbehorende werkwijze.

6 Referenties

6.1 Referenties

USACE, 2015

USACE Levee Screening Tool – Application Guide and Technical Reference Manual: Introduction, LST version 3.8, juni 2015

HKV, 2022

Memo Verschilanalyse Waterschadeschatter en SSM-2017, Jakolien Leenders, 5 augustus 2022

Wim Kanning et al., 2017

Derivation of the semi-probabilistic assessment rule for inner slope stability



Waterschap
Rivierenland

Gevolgen verbetering veiligheids- benadering regionale keringen

Stowa

Ontwikkelprogramma regionale keringen

sterke dijken

schoon water



Versie	Status	Datum	Auteur
1	Definitief	24-11-2023	Evelien van der Heijden

Bijdrage	Persoon	Functie	Organisatie
Opdrachtgever	H. van Hemert	Technisch adviseur waterkeringen	Stowa
Hoofdauteur	E. van der Heijden	Technisch adviseur waterkeringen	Stowa
Projectleider	H. van Hemert	Technisch adviseur waterkeringen	Stowa
Inhoudelijke bijdrage	H. De Bruijn	Senior adviseur geotechniek	Deltares
	T.A. van Duinen	Senior adviseur/ onderzoeker	Deltares
	R. Jongejan	Technisch adviseur waterkeringen	Jongejan Risk Management Consulting B.V.
	M. van Montfoort	Adviseur waterkeringen	HKV lijn in water
	J.D. Stoop	Adviseur waterkeringen	Hoogheemraadschap Schieland en de Krimpenerwaard
	J. Tigchelaar	Senior adviseur waterkeringen	HKV lijn in water

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Doel van dit document.....	4
1.2	Afkadering.....	4
1.3	Context en de relatie met andere documenten	5
1.4	Behoeftte: heldere basis, herleidbaar en uitlegbaar.....	6
1.5	Behoeftte: investering passend bij regionaal belang	7
1.6	Huidige methode is niet onjuist	7
1.7	Leeswijzer.....	7
2	Aanpak.....	8
2.1	De hoofdvraag behapbaar gemaakt	8
2.2	Informatieverzameling en detailniveau uitwerking.....	8
3	Gevolgen als actielijst	9
3.1	Gevolgen voor normeren	10
3.2	Gevolgen voor toetsen.....	11
3.3	Gevolgen voor beheren, programmeren en ontwerpen	12
3.4	Eenmalig, periodiek of continu?	13
4	Uitwerking onderzoeksvragen.....	14
4.1	Toetsmethode kán ongewijzigd blijven	14
4.2	Huidige berekeningen en resultaten zijn herbruikbaar	15
4.3	Lengte-effect.....	15
4.4	Eerste beschouwing onderzoeksresultaten	16
5	Verbeteropties.....	17
5.1	Introductie in de huidige methode	18
5.2	Heroverwegen bepaling gevolgschade	20
5.3	Heroverwegen vertaaltappen tussen normbeschrijvingen	21
5.4	Heroverwegen grondgedrag	23
5.5	Heroverwegen materiaalmodel	24
6	Normbeschrijvingen	26
7	Conclusies	27
8	Procesmatig advies.....	28
9	Literatuurlijst	29
	Bijlage 1: Input vanuit toezichthouders.....	30

1 Inleiding

Sinds de overstap van de primaire keringen op de overstromingskansbenadering, speelt voor de regionale keringen de vraag of de huidige veiligheidsbenadering van de regionale keringen nog passend is. Het Ontwikkelprogramma Regionale Keringen (ORK) van de Stowa onderzoekt dit.

1.1 Doel van dit document

Dit document vormt samen met een aantal andere documenten input voor een advies over de veiligheidsbenadering richting de stuurgroep van het ORK. De stuurgroep besluit over het al dan niet toepassen van de onderzochte verbeteringen van de veiligheidsbenadering.

In dit document wordt onderscheidt gemaakt in twee verschillende soorten van gevolgen van de verbetering van de veiligheidsbenadering.

Het eerste soort gevolgen hoort bij het (besluitvormings-) proces tot een verbeterde veiligheidsbenadering. De verbetering van de veiligheidsbenadering vereist het nemen van besluiten en het opstellen van methodes. Deze besluiten en methodes hebben invloed op het tweede soort gevolg; de gevolgen van het werken met de verbeterde veiligheidsbenadering.

Om inzicht te krijgen in de gevolgen voor het werken met de verbeterde veiligheidsbenadering, zijn voor twee onderzoeksvragen uitgewerkt. Het hiermee verkregen inzicht is input voor het bovengenoemde (besluitvormings-) proces van de stuurgroep van het ORK.

Daarnaast zijn een aantal verbeteropties uitgewerkt met als doel de discussie over deze onderwerpen te verbreden. Op het moment voert slechts een zeer select gezelschap fundamentele en impactvolle discussies, omdat de onderwerpen niet toegankelijk zijn voor een breder publiek. Het is nodig dat deze discussies in een bredere context gaan plaatsvinden.

Doelgroep document

De doelgroep van dit document zijn de deelnemers van de BGV&BGT. De vertaling naar de stuurgroep volgt in het bovenliggende advies.

1.2 Afkadering

Dit document bevat twee soorten gevolgen:

1. Behorende bij het besluitvormingsproces tot een verbeterde veiligheidsbenadering;
2. Het werken met de verbeterde veiligheidsbenadering.

Het gevolgen behorende bij het besluitvormingsproces tot een verbeterde veiligheidsbenadering zijn omschreven als een actielijst. Deze actielijst komt voort uit de aandachtspunten die medio 2022 in beeld zijn, veelal gevoed door de Begeleidingsgroepen Visie en Techniek¹ (BGV&BGT).

Om inzicht te krijgen in de gevolgen voor het werken met de verbeterde veiligheidsbenadering, zijn voor twee onderzoeksvragen uitgewerkt:

1. Leidt verbetering van de veiligheidsbenadering tot een andere manier van rekenen? Vraagt dit aanvullende gegevenswinning, kennisopbouw en/of capaciteit van medewerkers?
2. Zijn de huidige de toets-berekeningen en – resultaten herbruikbaar na verbetering van de veiligheidsbenadering?

¹ Begeleidingsgroepen Visie (BGV) en Techniek (BGT) zijn begeleidingsgroepen van het Ontwikkelprogramma regionale keringen (ORK) van de Stowa.

Overstromingskans en – risico zijn beschouwd

Het verbeteren van de veiligheidsbenadering leidt mogelijk tot het normeren op het niveau van overstromingskans- of overstromingsrisico. De impact van deze twee normbeschrijvingen zijn onderzocht.

De overige normbeschrijvingen (zie Hoofdstuk 6 Normbeschrijvingen) zijn tijdens het onderzoek kort benoemd en als onrealistische keuze van veiligheidsbenadering voor regionale keringen bevonden, en dus niet verder verkend.

Wat we niet beschouwen

Dit rapport verzamelt (onderzoeks)vragen en aandachtspunten die na uitvoering van de pilots begin 2022 zijn benoemd. In het najaar van 2022 is de veiligheidsbenadering nogmaals besproken tijdens de bijeenkomsten van de BGV&BGT¹. De aandachtspunten uit deze discussies zijn niet of slechts deels verwerkt. Het steeds updaten van deze rapportage met input uit een nog steeds lopende discussie verstoort de afronding van dit document. De ‘peildatum’ van dit rapport betreft medio 2022.

De volgende onderzoeksvragen worden in andere onderzoeken opgepakt:

- Bepaling gevolgen: HIS-SSM of waterschadeschatter
- Aansluiting NWB-normen en/of andere inundatienormen

1.3 Context en de relatie met andere documenten

Dit document is onderdeel van een reeks aan documenten die in opdracht van de Stowa worden opgesteld. De start van dit document ligt in de periode van afronding van de zeven pilotstudies [Stowa, 2021] en [Stowa, 2023], medio 2022. Stowa voerde de pilotstudies uit om inzicht te krijgen bij de mogelijkheden en aandachtspunten bij een mogelijke overstap naar een overstromingskansnorm. Hierbij werden een viertal verbeteringen in de veiligheidsbenadering in de praktijk gebracht. .

De verbeterpunten vanuit de stuurgroep ORK:

De *gevolgschade* bepalen we beter door:

1. Het meenemen van de significante gevolgen van een overstroming in de schadeberekening. Denk bijvoorbeeld aan bovenregionale effecten, indirecte schaden, schade door stremming scheepvaart en water aan- en afvoer, het aantal getroffen en eventueel slachtoffers, etc..
2. Het in de schadeberekening meenemen van mitigerende (nood-)maatregelen die de gevolgen van een overstroming beperken.

Als derde verbeterpunt houden we expliciet rekening met de (maatschappelijke) *kosten* die benodigd zijn om de keringen rond het overstroombare gebied aan de veiligheidsnorm te laten voldoen.

Als laatste verbeterpunt zien we een *passende toetsmethode* bij de verbeterde veiligheidsbenadering. De verbeterde veiligheidsbenadering leidt mogelijk tot een andere manier van toetsen. Een passende toetsmethode is een methode waarbij de benodigde informatie beschikbaar is en/of deze informatie in te winnen is met de voor regionale keringen beschikbare middelen.

Dit document verzamelt de (onderzoeks)vragen en aandachtspunten die medio 2022 door de BGV&BGT¹ zijn geuit naar aanleiding van de (concept) resultaten van de pilotstudies en de verbeterpunten vanuit de stuurgroep. Daarnaast zijn twee belangrijke onderzoeksvragen direct uitgewerkt.

Prille versies van dit document diende als basis voor verdere discussies over de gevolgen in de BGV&BGT¹ en hielpen bij de invulling van de impactanalyse.

De impactanalyse is het vervolg op de pilotstudies en focust op het zo goed mogelijk bepalen van de overstromingskans van een polder. Dit geeft een eerste beeld van de impact van de overstromingskansbenadering voor de waterkeringbeheerder. Hierin komen ook een aantal in dit document verzamelde (onderzoeks)vragen en aandachtspunten aan bod.

Deze ontwikkelingen zijn niet verwerkt in dit document. Dit document geeft de stand van zaken rond medio 2022.

De verschillende documenten die de Stowa laat opstellen in het kader van de veiligheidsbenadering ondersteunen het advies aan de stuurgroep van het ORK over welke veiligheidsbenadering de meest verstandige keus lijkt voor de toekomst.

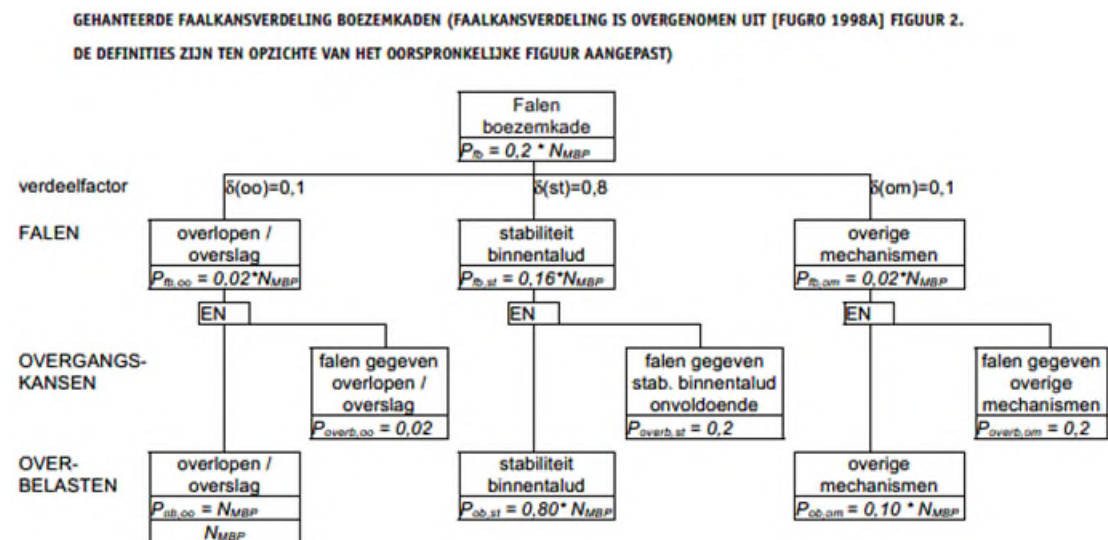
De stuurgroep besluit uiteindelijk over de toekomstige veiligheidsbenadering van de regionale keringen.

1.4 Behoeft: heldere basis, herleidbaar en uitlegbaar

Zowel bij de toezichthouders als de waterkeringbeheerders is behoefte aan een herleidbare en uitlegbare norm. De maatschappelijke investering in regionale keringen moet uitlegbaar zijn aan de belastingbetaler. En de belastingbetaler moet begrijpen welk beschermingsniveau zij geniet en waarop dit niveau is gebaseerd. Een methodiek gebaseerd op een kosten-baten-analyse biedt uitkomst.

De huidige methode doet reeds twee decennia dienst. De huidige methode ontwikkelde zich door verschillende onderzoeken en aanscherpingen, bijvoorbeeld het bijvoegen en aanscherpen van veiligheidsfactoren. Vertrekpunt was de ijking op het Systematisch kade-onderzoek [TAW, 1993] en vervolgens kwam de ‘top-down’ afleiding van het falen van de boezemkade (Figuur 1).

Allerlei aanpassingen op basis van voortschrijdend inzicht van de afgelopen 20 jaar bemoeilijken de herleidbaarheid en uitlegbaarheid van de huidige methode. De relatie tussen de huidige norm en de kosten-baten-analyse is niet meer te maken.



Figuur 1 De kans op falen van een boezemkade verdeeld over de verschillende faalmechanismen en vervolgens vertaald van een faalkans naar een overbelastingskans (overschrijdingskans) [IPO, 1999] en [Stowa, 2009].

Een herleidbare en uitlegbare norm is te bereiken door vanuit een kosten-baten analyse een technische norm af te leiden. Vervolgens is ruimte om zaken te verwerken in een bestuurlijke bepaling van de norm.

Verder is behoefte aan een helder opgebouwde set partiële veiligheidsfactoren (mits de verbeterde veiligheidsbenadering geschikt is voor semi-probabilistisch rekenen) zodat waterkeringbeheerders hierin zelf keuzes en optimalisaties kunnen aanbrengen.

De verbeterde veiligheidsbenadering moet toepasbaar zijn op alle type regionale keringen, zoals boezemwaterkeringen, regionale rivierdijken, voorlandkeringen en compartimenteringskeringen.

1.5 Behoefte: investering passend bij regionaal belang

Regionale keringen dienen een regionaal belang. Ze zorgen ervoor dat een watersysteem functioneert (boezemwaterkeringen) of voeren het water van een regio af. Het falen van een regionale kering leidt tot (grote) overlast, maar vaak niet tot dodelijke slachtoffers en landelijke ontwrichting van de samenleving.

Momenteel is veel capaciteit en geld nodig om de primaire keringen te versterken, zodat deze in 2050 aan de norm voldoen. Dit vergt een grote inspanning van de waterkeringbeheerders en de ingenieursbureaus. Daarnaast vraagt het versterken van de primaire keringen veel belastinggeld. Het is onwenselijk dat het verbeteren van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen leidt tot een (grote) toename aan druk op de waterkeringbeheerders, ingenieursbureaus en het belastinggeld.

Het verbeteren van de veiligheidsbenadering moet juist ruimte bieden om effectiever te toetsen en doelmatiger te versterken. Waar doelmatig, sluiten we aan bij de kennis- en softwareontwikkeling van de primaire keringen.

1.6 Huidige methode is niet onjuist

Tijdens het lezen van dit rapport kun je het gevoel krijgen dat de huidige methode waarop regionale keringen worden genormeerd, getoetst en ontworpen onjuist is. Wees gerust, de huidige methode is niet onjuist. Er zijn echter wel verbeterpunten wat betreft herleidbaarheid en uitlegbaarheid.

De huidige methode wordt al decennia toegepast en er komen nauwelijks doorbraken voor bij regionale keringen. Hieruit kun je afleiden dat de huidige methode leidt tot veilige keringen. Ook is de huidige methode makkelijk toepasbaar om een kering te toetsen en ontwerpen.

1.7 Leeswijzer

De inleiding in hoofdstuk 1 neemt je mee in de context en behoeftes en geeft het doel en afkadering van dit rapport. In hoofdstuk 2 lees je over de aanpak.

Hoofdstuk 3, 4 en 5 zijn de kern van dit rapport. Hoofdstuk 3 bevat een actielijst met besluiten en op te stellen methodes. Deze lijst is de vertaling van de verzamelde (onderzoeks)vragen en aandachtspunten uit de BGV&BGT¹. In hoofdstuk 4 zijn drie acties/onderzoeksvragen uitgewerkt. Vervolgens geeft hoofdstuk 5 nog wat achtergrond bij enkele verbeteropties van de veiligheidsfilosofie.

Hoofdstuk 6 geeft informatie over de normbeschrijvingen (o.a. overstromings- en overschrijdingskans) en de relatie tussen de beschrijvingen.

Het rapport sluit af met de conclusies in hoofdstuk 7 en een procesmatig advies voor het vervolg in hoofdstuk 8.

2 Aanpak

2.1 De hoofdvraag behapbaar gemaakt

De hoofdvraag is: ‘Welke gevolgen heeft het verbeteren van de veiligheidsbenadering voor toezichthouders en waterkeringbeheerders van regionale keringen?’.

Dit rapport draagt bij aan deze vraag door:

- Een overzicht te geven van de gevolgen behorende bij het (besluitvormings)proces (zie actielijst hoofdstuk 3);
- Twee onderzoeksvragen (uit hoofdstuk 3) uit te werken met als resultaat inzicht in de gevolgen van het verbeteren van de veiligheidsbenadering (zie paragrafen 4.1 en 4.2);
- Vier verbeteropties van de veiligheidsbenadering en/of rekenmethode iets uit te werken zodat deze onderwerpen begrijpelijker worden voor een breder publiek. Hierdoor kan de discussie breder gevoerd worden dan door een zeer select gezelschap (zie paragraaf 0).

Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn kaders nodig zoals:

- Welke verbeteringen van de veiligheidsbenadering beschouwen we?
- Tot welk detailniveau moeten de consequenties uitgewerkt worden?

Waarschijnlijk volgen deze kaders uit een iteratief proces. Het besluit welke verbeteringen door te voeren, hangt namelijk samen met de gevolgen van het doorvoeren van deze verbeteringen. Ook het gewenste detailniveau zal variëren per gevolg/onderzoeksvraag en fase van de besluitvorming.

Vooruitlopend op deze kaders zijn twee essentiële gevolgen onderzocht en uitgewerkt. De onderzoeksresultaten zijn belangrijke input voor verdere discussie en een GO/NO GO advies over het vervolg(onderzoek) van het doorvoeren van verbeteringen in de veiligheidsbenadering van regionale keringen.

De twee uitgewerkte onderzoeksvragen vallen onder het thema ‘toetsen’ en zijn:

1. Leidt verbetering van de veiligheidsbenadering tot een andere manier van rekenen? Vraagt dit aanvullende gegevensinwinning, kennisopbouw en/of capaciteit van medewerkers?
2. Zijn de huidige de toets-berekeningen en – resultaten herbruikbaar na verbetering van de veiligheidsbenadering?

2.2 Informatieverzameling en detailniveau uitwerking

De informatie in dit document is verzameld uit vier bronnen:

- Begeleidingsgroep Visie (ORK-Stowa)
- Begeleidingsgroep Techniek (ORK-Stowa)
- Gesprek toezichthouders (zie bijlage 1)
- Expertteam specialisten geotechniek/veiligheidsbenadering (zie colofon)

Overzicht gevolgen

De eerste drie bronnen hebben voornamelijk bijgedragen aan het overzicht van de gevolgen (zie de actielijst in hoofdstuk 3). Het expertteam specialisten heeft hierin een kleinere bijdrage.

Het overzicht van de gevolgen is gebaseerd op de ervaringen in de pilotstudies, medio 2022, en is waarschijnlijk niet volledig. Nieuwe kennis leidt mogelijk tot nieuwe behoeftes en mogelijk tot nieuwe aandachtspunten en (onderzoeks)vragen.

Uitwerking twee gevolgen voor ‘toetsen’

Samen met het expertteam specialisten geotechniek/veiligheidsbenadering zijn de drie onderzoeksvragen op het thema ‘toetsen’ kwalitatief uitgewerkt.

3 Gevolgen als actielijst

Dit hoofdstuk beschrijft de gevolgen behorende bij het (besluitvormings)proces tot een verbeterde veiligheidsbenadering. De verbetering van de veiligheidsbenadering vereist het nemen van besluiten en het opstellen van methodes.

Het uitwerken van de acties is waarschijnlijk een iteratief proces waarbij de norm- en kaderstellende partij een (aantal) scenario(s) kiest en vervolgens de waterkeringbeheerder inzicht geeft in de gevolgen (in middelen, data en resultaten) van een scenario. Hierbij verschilt het detailniveau van uitwerking per actie/onderzoeksvraag en fase van besluitvorming.

De (onderzoeks)vragen, aandachtspunten en behoeftes, geuit door de BGV&BGT¹ in gesprekken over het verbeteren van de veiligheidsbenadering, zijn verdeeld in drie thema's:

1. Normeren
2. Toetsen
3. Beheren, programmeren en ontwerpen.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de acties per thema. Onder de tabel zijn de acties uitgewerkt in drie paragrafen.

Sommige acties hebben prioriteit. Het antwoord op deze (onderzoeks)vraag heeft mogelijk een grote impact en/of risico en hiermee een significante invloed op de richting van het vervolg(onderzoek) van het verbeteren van de veiligheidsbenadering voor regionale keringen. Dit is aangegeven met het woord 'prio' in de eerste kolom van onderstaande tabel.

	Beschrijving
Normeren	
1 prio	Methode: Bepaling LIR en GR
2 prio	Methode: Bepaling alle gevolgschade
3 prio	Besluit: Input voor MKBA
4 prio	Besluit: Minimaal beschermingsniveau per burger
5	Besluit: Welk aantal slachtoffers relevant is
6	Methode: Verwerking gevolgbeperkende maatregelen
7	Inventariseer: Behoeftes aan tool bepaling norm
8	Methode: Bepaling norm met MKBA
Toetsen	
1 prio	Bepaal: Impact veiligheidsbenadering op toetsmethode
2 prio	Bepaal: Herbruikbaarheid huidige toetsresultaten
3 prio	Methode: Verwerking lengte-effect
4	Methode: Combineren van belastingen
5	Bepaal: Realiteitswaarde berekende faalkans
6	Methode: Combinatie overschrijdings- en overstromingskans
7	Methode: Opleveren overstromingskans terwijl enkele toetssporen niet probabilistisch bepaalt kunnen worden
8	Besluit: Maximaal toelaatbare faalkans per belastingscenario
9	Methode: Aantonen bewezen sterkte voor regionale keringen
Beheren, programmeren, ontwerpen	
1 prio	Methode: Economisch optimale ontwerp
2 prio	Bepaal: Impact wijzigingen veiligheidsbenadering op versterkingsopgave
3	Besluit: Toestaan ongedraineerd rekenen en acceptatie vervormingen
4	Methode: Bepaling leggerprofiel
5	Methode: Aanhaken, meenemen, communiceren met bestuurders

3.1 Gevolgen voor normeren

Het uitvoeren van onderstaande acties resulteert in een verbeterde methode om te normeren. Het kan zijn dat deze verbeterde methode op een andere norm uit komt dan momenteel het geval. Dat kan nu nog niet ingeschat worden. Hiervoor moeten eerst besluiten worden genomen en methodieken opgesteld, zoals beschreven in onderstaande acties.

Op gebied van normeren spelen de volgende vragen:

- Bepaling van de gevolgschade, onderverdeeld in:
 - Wel/niet meenemen dodelijke slachtoffers
 - Welke indirecte gevolgschade meenemen
 - Welke gevolgbeperkende maatregelen meenemen (o.a. watersysteem- en noodmaatregelen)
 - Bepaling directe gevolgschade
- Bepaling van de toetsnorm en ontwerpeis, onderverdeeld in:
 - Lokaal Individueel Risico (LIR) en groepsrisico (GR)
 - Wel/niet een minimaal beschermingsniveau per burger
 - Welke kosten en baten wegen mee om tot de economisch optimale norm te komen

Deze vragen zijn vertaald in onderstaand consequenties.

Prioriteit - gevolgschade:

1. Lokaal Individueel Risico (LIR) en groepsrisico (GR):
Stel een methode vast met regionale waarden voor de 'parameters' voor de bepaling van het LIR en het GR.
Bepaal de evacuatiefractie voor regionale keringen.
Leg vast hoe om te gaan met personen die dodelijk getroffen kunnen worden door zowel primaire als regionale keringen.
2. Maak inzichtelijk welke impact het zo compleet mogelijk meenemen van de gevolgschade heeft voor de norm (en de resulterende versterkingsopgave). Lever een methodiek aan om de gevolgschade te bepalen.
Denk hierbij onder andere aan gevolgschade van het overstroomde gebied én bijvoorbeeld bovenregionale effecten, schade aan de buitenwaartse oevers, schade door stremming scheepvaart, het niet meer functioneren van het boezemwatersysteem (maalstop in (delen van) de polder) en het aantal (dodelijk) getroffen.

Prioriteit - toetsnorm

3. Besluit in hoeverre de kosten-baten-analyse wordt meegenomen in de normering. Detaillering van de kosten-baten-analyse volgt onder consequentie 'normeren 8'.
4. Besluit of er een minimaal beschermingsniveau per burger gaat gelden, of dat voor de normering alleen de gevolgschade wordt beschouwd.

Overige consequenties - gevolgschade:

5. Besluit welk aantal slachtoffers relevant is.
6. Beschrijf hoe gevolgbeperkende maatregelen meegenomen mogen worden in zowel de toetsnorm als de ontwerpeis. Maak hierbij onderscheid tussen (vastgelegde en beheerde) watersysteemmaatregelen (zoals compartimentering van boezem en polder) en noodmaatregelen. Hierbij adviseren we om de inzet van noodmaatregelen kwalitatief aantoonbaar te maken en geen kwantitatieve toets te eisen.
7. Inventariseer de behoefte aan tools (software) om gebiedsontwikkeling te verwerken en inzicht te krijgen op het effect op de norm.

Overige consequenties – toetsnorm:

8. Lever een concrete methodiek om middels kosten-baten analyse tot een norm te komen. Heb hierbij aandacht voor verschillende typen regionale waterkeringen. Komen er landelijke IPO-tabellen per type regionale kering en voor 'bebouwd' en 'onbebouwd'? Of moeten toezichthouder en waterkeringbeheerder per strekking de kosten-baten-analyse uitwerken specifiek voor die situatie? Waar is behoefte aan en wat is haalbaar?

Neem in de overweging de ervaring van een proef bij HHNK mee: De investering om de kades rondom een polder met grasland tot een hoge norm op te waarderen, was erg laag. Hierdoor kregen de kades rond deze polder een hoge norm. Met een kleine extra investering wordt het risico enorm veel verkleind. De norm was zelfs hoger dan de kades rond de bebouwde, naastgelegen polder.

3.2 Gevolgen voor toetsen

Het uitvoeren van onderstaande acties geeft inzicht in de gevolgen van een verbetering van de veiligheidsbenadering voor waterkeringbeheerders en resulteert in een verbeterde methode om te toetsen, die aansluit bij de methode van normeren. De verbeterde methode vereist kennisontwikkeling en opleiding van waterkeringbeheerders en ingenieurs, maar is niet persé arbeidsintensiever. We streven juist naar een methode die past bij de beschikbare middelen bij regionale keringen.

Het is nu nog niet te bepalen of een andere manier van dataverzameling nodig is. Hiervoor moeten eerst besluiten genomen worden en methodieken worden opgesteld zoals genoemd in onderstaande acties. Een andere manier van dataverzameling is een groot gevolg (impactvol) voor de waterkeringbeheerders. Bij het uitwerken van onderstaande consequenties is het belangrijk de beschikbare middelen bij regionale keringen zwaar mee te wegen.

De acties met prioriteit (1 t/m 3) zijn uitgewerkt in hoofdstuk 4 Uitwerking onderzoeksvragen.

Prioriteit:

1. Bepaal of verbetering van de toetsmethode aanvullende gegevensinwinning, kennisopbouw en capaciteit van medewerkers vraagt.
2. Bepaal of de huidige de toets-berekeningen en – resultaten herbruikbaar zijn na verbetering van de veiligheidsbenadering.
3. Bepaal of het nodig is om het lengte-effect voor regionale keringen te verwerken. Lever, mits nodig, een methodiek passend bij regionale keringen om het lengte-effect te verwerken.

Overige consequenties – probabilistisch rekenen:

4. Combineren van (kansen op) belastingen:
Bepaal of het noodzakelijk en/of wenselijk is om de belastingen bv. probabilistisch of als scenario in te voeren. Houd hierbij rekening met de verschillende typen regionale waterkering.
Geef handvatten voor het bepalen van het voorkomen van belastingen, zoals:
 - De schematisering van calamiteitenverkeer (verkeersbelasting);
 - De vertaling van de neerslagstatistiek naar de hoogte van de freatische lijn.
5. Bepaal de realiteitswaarde van de berekende faalkans voor een regionale kering. Houd hierbij rekening met de heterogeniteit van de sterkte van de regionale keringen en de impact van vele verschillende belastingen². En de (beperkte) beschikbare middelen om de voorgaande parameters te onderzoeken.

² Bij primaire keringen is de buitenwaterstand duidelijk de bepalende belasting. Bij regionale keringen spelen vele zaken een rol, zoals verkeer, neerslag/freatische lijn, graverij, menselijk gebruik, leidingen.

Overige consequenties – combineren van semi-probabilistisch en probabilistisch

6. Werk een methodiek uit waarbij overschrijdingskans (profiel met veilige afmetingen) en overstromingskans gezamenlijk in één dijkkring worden toegepast.
7. Werk een methodiek uit om te komen tot een overstromingskans, terwijl een deel van de toetsproeven niet probabilistisch te bepalen is.
8. Besluit of er een maximaal toelaatbare faalkans per belastingscenario komt. Neem in dit besluit de behoefte vanuit de crisisorganisatie mee. Zoja, geef een concrete eis.

Overige consequenties – bewezen sterkte:

9. Lever een (vereenvoudigde) bewezen sterkte methodiek waarbij de vereiste inspanning en investering passend zijn bij regionale keringen. Als we overgaan naar overstromingskans en probabilistisch beoordelen is bewezen sterkte eenvoudig toe te passen, maar binnen een overschrijdingskansnorm is bewezen sterkte formeel niet toe te passen, vanwege het gebrek aan een faalkanseis.

3.3 Gevolgen voor beheren, programmeren en ontwerpen

Het uitvoeren van de acties uit voorgaande paragrafen resulteren in een verbeterde methode om te normeren en toetsen. Het kan zijn dat de verbeterde methode leidt tot een ander veiligheidsoordeel. Dan heeft de overstap naar een verbeterde veiligheidsbenadering ook invloed op het programmeren van de verbeteropgave. Dat kan nu nog niet ingeschat worden. Hiervoor moeten eerst besluiten worden genomen en methodieken opgesteld én toegepast, zoals beschreven in voorgaande paragrafen.

Prioriteit:

1. Bepaal een methode om specifiek voor boezemwaterkeringen tot een economisch optimale ontwerpeis te komen.
 - Door beperkte belastingtoename bij lagere terugkeertijden, is het bij boezemkades (vaak) een kleine investering om de faalkans enorm te verminderen. We voorzien dat de nu gebruikelijke methode om de ontwerpeis te bepalen, leidt tot een erg hoge ontwerpeis.
 - Denk ook aan de besluitvorming van het bestuur (uitleg waarom niet het minimale profiel wordt gerealiseerd) en de juridische status van de ontwerpeis (onteigenen o.b.v. ontwerpeis). Dit stimuleert het afleiden van een economisch optimale ontwerpeis i.p.v. deze gelijk te houden aan de toetsnorm. Deze optie wordt nu onderbenut.
2. Onderzoek of een verbeterde veiligheidsbenadering tot een andere (kleinere/grotere) versterkingsopgave leidt.

Overige prioriteiten:

3. Besluit of ongedraineerd rekenen bij de overstromingskans toegepast mag worden, hierbij acceptierend dat het grondlichaam (flink) mag vervormen. Geef hierbij ook aan hoe om te gaan met nevenfuncties (BGT) bij overstromingskansen en toelaatbare vervormingen.
4. Bepaal de methode hoe je tot een leggerprofiel komt als de voorgeschreven faalkansverdeling vervalst. Door verschillende verdelingen in de faalkansverdeling, voldoen verschillende geometriën aan de norm. Het resultaat moet bijdragen aan het proces van vergunningsverlening.
5. Stel een proces op om bestuurders mee te nemen in deze ontwikkeling. Geef hen duidelijk aan welke zaken bepaald worden op basis van feiten en formules en waar ruimte is voor bestuurlijke overwegingen.

3.4 Eenmalig, periodiek of continu?

Onderstaande tabel geeft aan of een consequentie eenmalig, periodiek of continu is. De tekst onder de tabel geeft nadere uitleg.

	Beschrijving	De taak is ..
Normeren		
1 prio	Methode: Bepaling LIR en GR	Periodiek
2 prio	Methode: Bepaling álle gevolgschade	Periodiek
3 prio	Besluit: Input voor MKBA	Eenmalig
4 prio	Besluit: Minimaal beschermingsniveau per burger	Eenmalig
5	Besluit: Welk aantal slachtoffers relevant is	Eenmalig
6	Methode: Verwerking gevolgbeperkende maatregelen	Periodiek
7	Inventariseer: Behoeftte aan tool bepaling norm	Eenmalig
8	Methode: Bepaling norm met MKBA	Periodiek
Toetsen		
1 prio	Bepaal: Impact veiligheidsbenadering op toetsmethode	Eenmalig
2 prio	Bepaal: Herbruikbaarheid huidige toetsresultaten	Eenmalig
3 prio	Methode: Verwerking lengte-effect	Continu
4	Methode: Combineren van belastingen	Eenmalig
5	Bepaal: Realiteitswaarde berekende faalkans	Eenmalig
6	Methode: Combinatie overschrijdings- en overstromingskans	Continu
7	Methode: Opleveren overstromingskans terwijl enkele toetssporen niet probabilistisch bepaalt kunnen worden	Continu
8	Besluit: Maximaal toelaatbare faalkans per belastingscenario	Eenmalig
9	Methode: Aantonen bewezen sterkte voor regionale keringen	Continu
Beheren, programmeren, ontwerpen		
1 prio	Methode: Economisch optimale ontwerpeis	Periodiek
2 prio	Bepaal: Impact wijzigingen veiligheidsbenadering op versterkingsopgave	Eenmalig
3	Besluit: Toestaan ongedraineerd rekenen en acceptatie vervormingen	Eenmalig
4	Methode: Bepaling leggerprofiel	Periodiek
5	Methode: Aanhaken, meenemen, communiceren met bestuurders	Continu-tijdelijk

Normeren: Eenmalig en periodiek

Het normeren van waterkeringen gebeurt periodiek. Dan bepaal je de getroffen (1), de gevolgschade (2) en gevolgbeperkende maatregelen (6) en de norm (8). Daarom zijn deze zaken 'periodiek'. De 'eenmalige' consequenties hoeven maar één keer besloten of geïnventariseerd te worden. De uitkomst van het eenmalige besluit heeft impact op de periodieke bepaling van de norm.

Toetsen: Eenmalig en continu

Waterkeringbeheerders toetsen hun waterkeringen continu. Bijvoorbeeld voor een vergunningsaanvraag, de bepaling van een leggerprofiel of het bepalen van het veiligheidsoordeel. Deze 'toetsingen' voer je uit met de methodieken (3, 6, 7 en 9) die ontwikkeld moeten worden. De resultaten uit de 'eenmalige' consequenties worden verwerkt in de methodieken.

Beheren, programmeren, ontwerpen: Eenmalig, periodiek en continu-tijdelijk

Het bepalen van de ontwerpeis (1) en het leggerprofiel (4) zijn periodieke taken, daarom zijn de methodes die hieraan ten grondslag liggen gemerkt als 'periodiek'. Het aanhaken, meenemen en communiceren met bestuurders (5) is een continue taak, maar alleen tijdens het proces van het introduceren van de verbeteringen. Vandaar dat deze taak 'continu-tijdelijk is'.

4 Uitwerking onderzoeksvragen

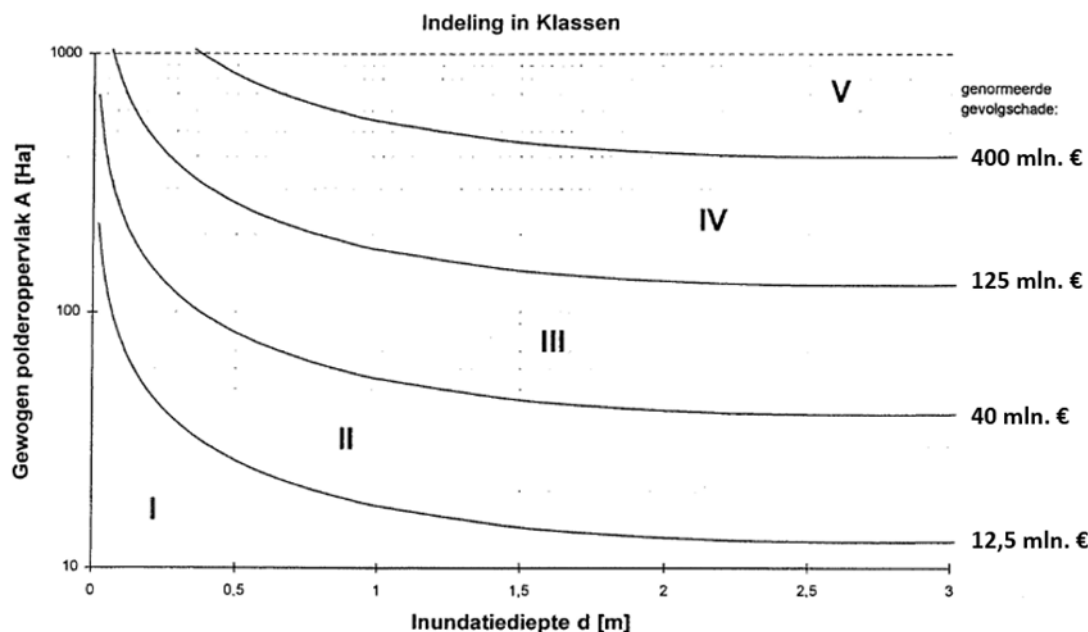
4.1 Toetsmethode kán ongewijzigd blijven

Bepaal of verbetering van de veiligheidsbenadering een andere toetsmethode vraagt. Geef aan of dit aanvullende gegevensinwinning, kennisopbouw en capaciteit van medewerkers vraagt.

De huidige manier van rekenen kan van toepassing blijven bij een verbeterde veiligheidsbenadering.

Zoals nu al het geval is, is een overstromingsrisico-norm te vertalen naar een eis op overstromings- en overschrijdingskans. Hierdoor kan de toets in de toekomst nog steeds op overschrijdingskansniveau, zoals we nu gewend zijn. Het is wel waarschijnlijk dat partiële factoren (benodigd om semi-probabilistisch te rekenen) wijzigen als we deze opnieuw en herleidbaar afleiden.

Figuur 2 is een knipsel uit de IPO-richtlijn ter bepaling van de veiligheidsniveau van boezemkaden [IPO, 1999], met daarin de herziene genormeerde gevolgschade [Stowa, 2022]. Hier is te zien dat de huidige IPO-klassen hun oorsprong vinden in een overstromingsrisico-gedacht. Dit blijft de basis voor de verbeterde veiligheidsbenadering.



Figuur 2 Grafiek ter bepaling van de (kade)klasse, gebaseerd op de benaderende genormeerde schadeberekening [IPO, 1999], waarbij de genormeerde gevolgschade herzien is [Stowa, 2022].

Het materiaalmodel

De huidige veiligheidsbenadering is geënt op het overschrijdingskansniveau. We gebruiken semi-probabilistische stabiliteitsberekeningen waarbij gedraineerd grondgedag wordt verondersteld en de sterkte wordt berekend volgens het materiaalmodel van Mohr-Coulomb. Dit type berekening kan ook gebruikt worden om te toetsen aan een norm op overstromingskans, indien we de overstromingskansnorm met partiële factoren kunnen versimpelen naar een semi-probabilistische overschrijdingskans berekening.

Bij primaire keringen ging de overstap van een toets op overschrijdingskans naar overstromingskans gepaard met een overstap in het materiaalmodel; namelijk de veronderstelling van ongedraineerd grondgedrag volgens het materiaalmodel van Critical State Soil Model (CSSM). Omdat beide wijzigingen gelijktijdig gebeurde, ontstond het beeld dat toetsen op overstromingskans een ander grondmodel vereist. Dat is niet zo.

Het verbeteren van de veiligheidsbenadering biedt ruimte om andere rekenmethodes en grondmodellen toe te passen. Hierover meer in hoofdstuk 5 Verbeteropties.

4.2 Huidige berekeningen en resultaten zijn herbruikbaar

Bepaal of de huidige de toets-berekeningen en – resultaten herbruikbaar zijn na verbetering van de veiligheidsbenadering.

Ja, de afzonderlijke rekenresultaten uit huidige en voorgaande toetsrondes blijven bruikbaar. Dit komt omdat de verbeterde toetsmethode dezelfde basis heeft als de huidige (zie voorgaande paragraaf).

De herleidbaarheid van de huidige methode hoeft niet verbeterd te worden om de huidige berekeningen en resultaten te hergebruiken. Hierdoor voorkomen we dat de focus ligt op ‘wat is er in het verleden niet goed geweest’ of ‘hoe het bedoeld is’. We willen onze energie gebruiken om de veiligheidsbenadering te verbeteren, niet om steeds achterom te kijken.

Het kan zijn dat voortschrijdend inzicht leidt tot andere uitgangspunten waardoor resultaten uit het verleden niet een-op-een gebruikt kunnen worden. Dit is niet anders dan bij andere uitgangspunten die aangepast worden (zoals de huidige leidraad een andere schematisering van de verkeersbelasting voorschrijft dan de vorige).

4.3 Lengte-effect

Bepaal of het nodig is om het lengte-effect voor regionale keringen te verwerken. Lever, mits nodig, een methodiek passend bij regionale keringen om het lengte-effect te verwerken.

Het concrete antwoord op deze onderzoeksvraag ontbreekt nog. Hier onder volgen de stappen om tot een antwoord te komen.

Allereerst moet men besluiten of we het lengte-effect willen toepassen als zijnde een factor zoals bij de primaire keringen of dat een meer praktische methode volstaat. De impactanalyse³ geeft een praktische methode om het lengte-effect te verwerken. Na het afronden van de impactanalyse³ kan men besluiten welke methode voor regionale keringen het best passend is.

Vervolgens wordt duidelijk wat benodigd is om het lengte-effect toe te passen voor regionale keringen.

Wat is het lengte-effect?

Het lengte-effect is het principe dat de kans op falen van een serie systeem⁴ toeneemt met de lengte van het systeem (het aantal componenten). Bij primaire keringen is dit verwerkt als een factor die de eis op trajectniveau omzet naar een eis per doorsnede. Het lengte-effect zorgt bij primaire keringen voor een flink hogere eis op doorsnedeniveau dan op trajectniveau. Er zijn zorgen dat de introductie van het lengte-effect leidt tot een verhoging van de eisen.

³ De impactanalyse is een project dat parallel aan de afronding van dit rapport wordt opgestart.

⁴ Serie systeem = als één component faalt, faalt het systeem.

Zoals bij een schakelketting met een aantal schakels: hoe meer schakels, hoe groter de kans dat er één kapot gaat.

4.4 Eerste beschouwing onderzoeksresultaten

Waarom wijzigt er zo weinig?

Bovenstaande antwoorden geven aan dat er in de basis weinig hoeft te veranderen bij een verbetering van de veiligheidsbenadering. Wanneer heldere vertaalstappen tussen norm-beschrijvingen bestaan, zijn veel zaken te herleiden naar de manier waarop we nu rekenen. Die boodschap is tegenstrijdig met de zorgen die leven. Die zorgen zijn over zaken die waarschijnlijk gaan wijzigen om tot een herleidbare veiligheidsbenadering te komen. Ook is het waarschijnlijk dat het opnieuw afleiden van partiële factoren (benodigd om semi-probabilistisch te rekenen) leidt tot andere waardes van deze factoren. Dit leidt mogelijk tot een ander veiligheidsoordeel.

Wat wijzigt er dan wel?

De verbeterde veiligheidsbenadering geeft waterkeringbeheerders de ruimte om de vertaalstappen tussen de norm-beschrijvingen ⁵ gebieds- of kering specifiek te maken. Nu gelden landelijke, conservatieve, niet herleidbare vertaalslagen, zoals de 'factor 5' tussen de overstromingskans en de overschrijdingskans en de schadefactor die op een beperkte gamma-beta relatie is geënt.

Verder biedt normeren op overstromingskans ruimte voor bijvoorbeeld faalkansupdatering en het probabilistisch benaderen van belastingcombinaties⁶. Normeren op overstromingsrisico biedt ruimte om meerlaagse veiligheid expliciet mee te nemen. De huidige overschrijdingskansbenadering en rekenmethode bieden geen ruimte voor deze methoden.

⁵ Vertaling van overstromingsrisico -> overstromingskans en overstromingskans -> overschrijdingskans

⁶ In de huidige methode neem je aan dat iedere belasting die misschien voor kán komen, gelijktijdig optreedt. Dit is vaak een conservatieve aanname.

5 Verbeteropties

In dit hoofdstuk is een aantal onderwerpen uitgewerkt met als doel de discussie over deze onderwerpen te verbreden. Op het moment voert slechts een zeer select gezelschap fundamentele en impactvolle discussies, omdat de onderwerpen niet toegankelijk zijn voor een breder publiek. Het is nodig dat deze discussies in een bredere context gaan plaatsvinden.

De stuurgroep van het ORK gaf opdracht tot het onderzoeken van een viertal verbeterpunten de veiligheidsbenadering. Concrete verbeterpunten zijn het beter in kaart brengen van de gevolgen van een overstroming (gemeden kosten) en het meewegen van de investering (kosten) om een waterkering aan de norm te laten voldoen. Hierbij wordt een passende rekenmethode opgeleverd.

Dit hoofdstuk beschrijft van vier (optionele) verbeterpunten de huidige praktijk, de nadelen hiervan en een voorstel voor de toekomst. De vier verbeterpunten zijn:

- 5.2 Heroverwegen bepaling gevolgschade
- 5.3 Heroverwegen vertaalstappen tussen normbeschrijvingen
- 0

- Heroverwegen grondgedrag
- 5.5 Heroverwegen materiaalmodel

Verbetering herleidbaarheid (huidige) veiligheidsbenadering

Tijdens dit onderzoek bleek dat sommige zaken in de huidige werkwijze niet herleidbaar zijn. Het doel van het verbeteren van de veiligheidsbenadering is niet het verklaren van de huidige methode, maar het opleveren van een verbeterde methode om in de toekomst mee te werken. We richten onze energie op de toekomst.

De herleidbaarheid van de verbeterde veiligheidsbenadering is van groot belang. Dit geeft ruimte om zelf keuzes en optimalisaties aan te brengen.

Bij een herleidbare veiligheidsbenadering is ook ruimte voor pragmatische keuzes. Goede vastlegging van deze keuzes en de (kwantitatieve) onderbouwing is van groot belang.

5.1 Introductie in de huidige methode

Normeren

De normklasse van de kade is afhankelijk van de klasse van de achterliggende polder. De klasse van de polder lees je af in Figuur 2. Drie factoren bepalen de klasse:

1. het gewogen polderoppervlak;
2. de inundatiediepte;
3. de genormeerde gevolgschade.

De klasse is dus afhankelijk van de gevolgen van de overstromingsgebeurtenis. Hiermee is dit in de basis een norm o.b.v. overstromingskans. Voor regionale keringen veronderstellen we een vaste verhouding tussen de kans op overstroming en de kans op overbelasten (factor 5). De resulterende overschrijdingskans is de nu geldende norm.

De huidige normering houdt geen rekening met verschillende type regionale keringen, terwijl de variatie onder regionale keringen groot is.

Denk bijvoorbeeld aan het verschil in de kosten (voor risicoreductie) om een strekking te verbeteren die door een woonkern loopt of een strekking langs een weiland.

Of de belastingtoename tussen de klassen. Bij een boezemkade zijn de 1/10 en 1/300 belastingssituaties redelijk vergelijkbaar, bij sommige regionale rivierdijken betekent dit één of enkele meters aan waterstandverschil.

Verbeteropties normeren:

- 5.2 Heroverwegen bepaling gevolgschade
- 5.3 Heroverwegen vertaalstappen tussen normbeschrijvingen

Toetsen aan de eis/norm

De stabiliteit van een waterkering bepalen we doorgaans door een stabiliteitsberekening te maken. Vervolgens toetsen we de berekende stabiliteit aan de norm. Een stabiliteitsberekening is een modelmatige weergave van de werkelijkheid. Bij het maken van een stabiliteitsberekening worden vele keuzes gemaakt. Een aantal keuzes hebben grote gevolgen. Zo bepalen het grondgedrag en het materiaalmodel dat je kiest respectievelijk de wijze waarop je de sterkte bepaalt en welk rekenmodel je kan toepassen.

Verbeteropties toetsen:

- Heroverwegen grondgedrag
- 5.5 Heroverwegen materiaalmodel

5.2 Heroverwegen bepaling gevolgschade

Huidige praktijk

De schadeberekeningen waarop de meeste normen nu zijn gebaseerd, zijn meer dan tien jaar oud. Nu is het mogelijk om meer gedetailleerde schadeberekeningen te maken. Hierbij wordt rekening gehouden met (lijn)elementen en verschil in maaiveldhoogte. Ook rekenen huidige schadeberekeningen enige opslag voor indirecte schade.

Paragraaf § 3.1 Gevolgen voor normeren beschrijft een aantal acties die voorkomen uit behoeftes tot verbetering voor de toekomstige methode.

Nadelen huidige methode

De huidige methode beschouwt alleen de gevolgen in de polder. En in oude schadeberekeningen wordt geen rekening gehouden met gevolgsturende elementen in de polder. Denk aan altijd aanwezige elementen die het verloop van de overstroming beïnvloeden (bv. een verhoogd weglichaam of een natuurlijke laagte in de polder) of door de water(kering)beheerder geplaatste (compartimenterings-)werken. Deze gevolgsturende elementen kunnen zowel een positief als negatief effect hebben op de berekende gevolgschade.

De huidige methode leidt in de volgende gevallen tot een (grote) onderschatting van de gevolgschade:

- Door het falen van een waterkering verliest het (buiten)water zijn functie.
 - Het watersysteem stakt. Het water wordt niet meer naar het boezemgemaal getransporteerd en de poldergemalen moeten stoppen met malen. Berging vindt plaats in de polders, waardoor ook wateroverlast ontstaat in de polders die niet direct zijn overstroomd.
 - De vaarweg is niet meer bruikbaar waardoor transport over water stremt.
 - Recreatie op het water is niet mogelijk.
- Het falen van een waterkering zorgt voor een (snelle) daling van het (buiten)water waardoor schades aan de oever optreden.
- Uitval of onbereikbaarheid van belangrijke (regionale) voorzieningen (zoals een ziekenhuis of elektriciteitscentrale) zijn nu niet expliciet meegenomen. Vaak zijn deze nu (impliciet) verwerkt in de bestuurlijke afweging van de norm.

Bovenstaande indirecte gevolgen zorgen vooral bij boezem- en kanaalkaden tot een (grote) onderschatting van de gevolgschade. Zo bleek de schade aan de waterzijde bij de kadedoorbraak in Wilnis vele malen groter dan de schade in het overstroomde gebied.

Daarnaast is het in de huidige methode lastig/omslachtig om het effect van ruimtelijke ontwikkeling op de norm te bepalen. Hierdoor wordt het effect op de norm, en bijkomende maatschappelijk kosten, vaak niet besproken in het plannen van ruimtelijke ontwikkeling. Hierdoor ontbreekt het gesprek over de potentie van meerlaagse veiligheid en de manier waarop ruimtelijke ontwikkeling hierin kan bijdragen.

Voorstel toekomst

Neem in de bepaling van de gevolgschade niet alleen de directe gevolgen in de overstroomde polder mee. Verwerk ook de indirecte schade door functieverlies van het (buiten)water, de schade aan de oevers en uitval van belangrijke voorzieningen mee in de gevolgschade. Als het falen van een regionale kering leidt tot slachtoffers, neem je ook dit mee in de gevolgschade.

Een completer beeld van de gevolgschade heeft effect op de verbeterde veiligheidsbenadering, ongeacht welke normbeschrijving wordt gekozen.

5.3 Heroverwegen vertaalstappen tussen normbeschrijvingen

Huidige methode

De huidige overschrijdingskans is een afgeleide van een overstromingskans (kans op falen). Er geldt een gelijke verhouding tussen de kans op overstroming en de kans op overbelasten. Deze verhouding is niet herleidbaar. Hieronder volgt de uitwerking voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnentalud voor boezemwaterkeringen.

Figuur 2.1 uit rapport Materiaalfactoren Boezemkaden [Stowa, 2009] geeft de formule $P_{fb} = 0,2 * N_{MBP}$ (tevens in voorliggende rapportage als Figuur 1), met daarin:

- P_{fb} : kans op falen van de boezemkade
- N_{MBP} : overschrijdingsfrequentie van het maatgevend boezempeil [1/jaar]

We veronderstellen dat de kans op falen van de boezemkade (P_{fb}) gelijk is aan de overschrijdingsfrequentie van het maatgevend boezempeil (N_{MBP}) gedeeld door 5. Een norm van 1/100 vertaalt zich in een overstromingskans van 1/500 (P_{fb}). Deze 'factor 5' is niet herleidbaar.

In hetzelfde figuur zien we overgangskansen, met de formule $P_{overb,st} = 0,2$ voor macrostabiliteit binnentalud, met daarin:

- $P_{overb,st}$: kans op falen gegeven stabiliteit binnentalud onvoldoende

Ofwel: $P_{fb} = 5 * P_{overb,st}$

We veronderstellen dat slechts in één van de vijf gevallen dat de stabiliteit van het binnentalud niet voldoet, er falen optreedt. Het niet voldoen van de stabiliteit van het binnentalud ($P_{overb,st}$) is een situatie waarbij de belasting wordt overschreden. Dus in één van de vijf gevallen van het overschrijden van de belasting, treedt falen op.

Als we hier de overstromingskans (P_{fb}) van 1/500 invullen, volgt een overschrijdingskans ($P_{overb,st}$) van 1/100 voor de macrostabiliteit binnentalud van boezemwaterkeringen.

De huidige overschrijdingskans is niet terug te herleiden naar een overstromingsrisico.

Nadelen huidige methode

De huidige veiligheidsbenadering is gebaseerd op 'geen trendbreuk' met het systematisch boezemkade onderzoek [TAW, 1993]. Het systematisch boezemkadeonderzoek is gebaseerd op celproeven en sluit daarom niet meer aan bij de huidige rekenmethodiek.

De huidige veiligheidsbenadering is niet (geheel) herleidbaar. Dit komt mede door de rijke historie van de benadering. Al in 1965 is de basis gelegd [TAW, 1993]. Door de tijd heen zijn vele bouwstenen bijgevoegd en sommige zaken aangepast. Er ontbreekt één integrale beschrijving, waarin de basis inclusief bouwstenen en wijzigingen, zijn beschouwd.

Er is grote behoefte aan herleidbaarheid. Daarom krijgt 'de vorm' speciale aandacht (zie hier onder Voorstel toekomst- de vorm).

Voorstel toekomst – de inhoud

Maak helder welke vertalingstap er zit tussen de verschillende normbeschrijvingen (overstromingsrisico, -kans en overschrijdingskans). Dit geeft waterkeringbeheerders de mogelijkheid om bewust te kiezen voor het landelijke advies, of afwijken door gebieds- of locatiespecifiek te optimaliseren.

Hierbij moet meer aandacht zijn voor verschillen in type kering, waarbij de kosten van risicoreductie en belastingtoename belangrijke onderscheidende factoren zijn. De verwerking hiervan kan bijvoorbeeld door het maken van meerdere IPO-tabellen of kengetallen per type.

Voorstel toekomst – de vorm

Maak één document met daarin alle informatie om van de te kiezen normbeschrijving (overstromingsrisico of -kans) de toetseis af te leiden voor de andere normbeschrijvingen (overstromings- en overschrijdingskans). Dit document bevat alle benodigde gegevens en een concrete methode. Er wordt verwezen naar andere documenten om de herkomst van informatie te herleiden én alle relevante informatie wordt tevens opgenomen in het document.

Het document maakt keuzes expliciet. Bij iedere keuze wordt de volgende informatie gegeven:

- De aannahme/keus inclusief onderbouwing bij de huidige veiligheidsbenadering.
- De aannahme/keus inclusief onderbouwing van het toekomstige advies.
 - Als deze onderbouwing wankelt: aangeven wat de impact is en bij grote impact vervolgonderzoek zodat deze keuze goed wordt onderbouwd.
 - Het voorstel kan ook het advies zijn om als waterkeringbeheerder de aannahme/keus zelf te bepalen.
- Als wordt geadviseerd om het de waterkeringbeheerder zelf te laten bepalen, dan bevat het document een handvat hoe je deze bepaling uitvoert.

De herleidbare vertaling tussen de overstromings- en overschrijdingskans dient twee doelen:

1. De herbruikbaarheid van de huidige toetsresultaten o.b.v. de overschrijdingskans;
2. Het biedt de waterkeringbeheerders inzicht in de mogelijke optimalisaties die zijn in deze vertaalstap gebieds- of keringspecifiek kunnen maken.

De behoefte aan uitwerking van de vertaalstap tussen overstromingsrisico en -kans is afhankelijk van welke normbeschrijving wordt gekozen om in de toekomst de regionale keringen te normeren.

5.4 Heroverwegen grondgedrag

Het veronderstelde grondgedrag is van grote invloed op de berekende stabiliteit. De berekende stabiliteit is afhankelijk van de schuifsterkte van de grond. En deze schuifsterkte wordt berekend op basis van sterkteparameters. De bepaling en afleiding van de sterkteparameters is afhankelijk van het grondgedrag dat je veronderstelt.

Hierbij zijn twee zaken belangrijk:

- Komt het poriewater tussen de korrels/plaatjes/vezels ² onder spanning te staan bij vervormingen of niet. Ofwel, is er ongedraineerd of gedraineerd gedrag?
- Heeft de grond in alle richtingen dezelfde sterkte of niet. Ofwel, is er isotroop of anisotroop gedrag?

Het grondgedrag verschilt per grondsoort. En waterkeringen bestaan uit verschillende grondsoorten. Daarnaast verschilt de belastingtoestand bij verschillende type keringen (boezemwaterkeringen, keringen langs een regionale rivier, waterkeringen met of zonder weg erop). Daarom kun je niet één generieke keuze maken voor het grondgedrag van alle grondsoorten en voor alle regionale keringen.

Huidige methode

Uitgaan van gedraineerd gedrag is het meest gangbaar bij regionale keringen. Triaxiaalproeven (veelal op klei) worden vaak ongedraineerd uitgevoerd en omgezet naar gedraineerde parameters.

Veen wordt tegenwoordig vaak beproeft met de Direct Simple Shear proef (DSS-proef). In 2015 legde de Leidraad [Stowa, 2015] conservatieve en pragmatische materiaalfactoren vast voor veen beproefd met de DSS-proef. Voor 2015 werd de triaxiaalproef algemeen gebruikt om de sterkte van veen te bepalen. Mogelijk gebruiken enkele waterschappen sterkteparameters voor veen die gebaseerd zijn op triaxiaalproeven.

Ook het gebruik van isotrope of anisotrope proeven is niet consistent in Nederland. Rond 2013 kwam het anisotrope gedrag van grond aan het licht. In de materiaalfactoren voor regionale keringen wordt geen onderscheid gemaakt tussen sterkteparameters verkregen uit isotrope of anisotrope proeven.

Bij het anisotroop consolideren van monsters van slappe grond vindt soms al veel vervorming plaats, dat leidt tot monsterverstoring. In dat geval geeft een anisotrope sterkteproef op slappe grond (vaak) een onbetrouwbaarder proefresultaat. Dit maakt het lastiger om sterkteparameters af te leiden. Daarom kiezen sommige waterkeringbeheerders voor isotrope laboratoriumproeven.

Waterkeringbeheerders streven naar een betrouwbaar en stabiel veiligheidsoordeel van hun keringen. Hierin betekent 'betrouwbaar en stabiel' dat het veiligheidsoordeel niet onvoorspelbaar verandert door kleine wijzigingen in de invoer van de berekening.

Een aantal invoerparameters hebben een grote invloed op het rekenresultaat. Sommige van deze parameters zijn erg variabel en/of moeilijk te bepalen. Het gebruik van rekenmethodes waar dit soort parameters in voorkomen, leidt dus tot een minder betrouwbaar en stabiel veiligheidsoordeel. Dit vergroot het risico op een niet-stabiel versterkingsprogramma.

Nadelen huidige methode

Het ongedraineerde grondgedrag wordt genegeerd. Dit kan leiden tot zowel over- als onderschatting van de aanwezige schuifsterkte.

Het werkelijk aanwezige anisotrope grondgedrag kan niet (betrouwbaar) beproeft worden.

² Zandkorrels, kleiplaatjes en vezels in het veen.

Voorstel toekomst

Geef ruimte om het best passende grondgedrag te modelleren, passend bij (de doorlatendheid van) de grondsoort, de snelheid van vervorming van het grondlichaam én de betrouwbaarheid van bepaling. Biedt waterkeringbeheerders de benodigde kennis om dit te doen. Denk hierbij aan begrijpelijke uitleg over de onderliggende fysica en de vertaling en verschaling van de wetenschap (op korrelniveau) naar de praktijk (in het dijklichaam).

Het voorschrijven van isotrope of anisotrope sterkteparameters is niet doelmatig. Hiermee verplicht je ongeveer de helft van de waterkeringbeheerders opnieuw te investeren in een proevenverzameling. Geef ook hier ruimte om de waterkeringbeheerders naar eigen inzicht tot betrouwbare sterkteparameters te komen. Hierbij adviseren we om landelijk samen te werken. Het grondgedrag wijzigt niet bij de waterschapsgrens.

5.5 Heroverwegen materiaalmodel

Het materiaalmodel moet aansluiten bij het te modelleren grondgedrag. En zoals in voorgaande paragraaf vermeldt, verschilt dit per type kering, belasting, grondopbouw, toegestane vervormingen én de uitvoerbaarheid om tot een betrouwbaar veiligheidsoordeel te komen.

Een belangrijke factor bij het materiaalmodel is dat het (praktisch) werkbaar moet zijn in de beschikbare rekensoftware.

Huidige methode

De huidige veiligheidsbenadering gaat uit van het materiaalmodel van Mohr-Coulomb. Hierbij bepaal je de schuifsterkte met een lineaire functie met de parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving.

$$\tau = c' + \sigma_n * \tan(\varphi)$$

Met daarin:

τ	: gedraineerde schuifsterkte
c'	: effectieve cohesie
σ_n	: normaalspanning (korrelspanning)
φ'	: effectieve wrijvingshoek

De cohesie en hoek van inwendige wrijving bepaal je bij een specifiek rekpercentage. De gekozen rekpercentages variëren tussen de 5-25% voor klei (triaxiaalproef) en 20-40% voor veen (DSS-proef).

De overschrijdingskansbenadering toetst of een bepaalde belasting veilig gekeerd kan worden. Dit is vertaalt in een beperkte toelaatbare vervorming. De materiaalfactoren die de Leidraad [Stowa, 2015] geeft, gelden voor geconsolideerde, ongedraineerde triaxiaalproeven met een vervorming van 2 á 5%.

Nadelen huidige methode

In de huidige software⁸ is bij het materiaalmodel Mohr-Coulomb de sterkte niet spanningsafhankelijk in te voeren. Vroeger kon dit wel door het gebruik van sigma-tau curves.

Bij lage spanningen (onder de grensspanning) reageert grond stijver dan bij hogere spanningen. Echter zijn de meeste proefresultaten gemeten bij hogere spanningen, omdat het correct uitvoeren van laboratoriumproeven bij lage spanningen in de praktijk onmogelijk is (o.a. door monsterverstoring).

We extrapoleren het (slappere) grondgedrag in het hogere spanningsbereik dus naar het (stijvere) gedrag in het lagere spanningsbereik. Hierdoor leidt Mohr-Coulomb bij lage spanningen vaak tot een onderschatting van de schuifsterkte.

⁸ In Nederland werken we standaard met D-Geo Suite. Er bestaat andere software, maar die wordt in Nederland niet/nauwelijks gebruikt.

Lagere spanningen komen bij regionale keringen vaak voor, vooral in het veenweidegebied. De berekende stabiliteit van een (boezem)waterkering in het veenweidegebied onderschat zo de werkelijk aanwezige sterkte en stabiliteit.

Voorstel toekomst

Geef de waterkeringbeheerders handvatten om op eenduidige wijze verschillende materiaalmodellen toe te passen, passend bij de waterkering. Biedt waterkeringbeheerders de benodigde kennis om dit te doen. Denk hierbij aan begrijpelijke uitleg over de onderliggende fysica en de vertaling en verschaling van de wetenschap (op korrelniveau) naar de praktijk (in het dijklichaam).

6 Normbeschrijvingen

De norm kan op verschillende manieren beschreven zijn. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de normbeschrijvingen en de bijbehorende toetseis. De rechter kolom geeft de 'aannames stap tussen beschrijvingen'. Met deze aanname kun je de norm in de bovenste regel afleiden naar een norm in de regel er direct onder.

Nu normeren we regionale keringen met een overschrijdingskans. De overschrijdingskans is een afgeleide van de andere normbeschrijvingen zoals de overstromingskans en het overstromingsrisico. In onderstaande tabel is te zien dat als we aannemen dat er een gelijke verhouding is tussen de kans op overstroming en de kans op overbelasting, we de overschrijdingskans kunnen afleiden uit de overstromingskans. Een overstromingskans van 1/500 jaar wordt vertaald naar een overschrijdingskans van 1/100 jaar.

Onderstaande tabel geeft aan dat door het normen op overschrijdingskans veel aannames vastliggen (alle aannames in de rechter kolom). Het normeren op een bovenliggende normbeschrijving geeft meer vrijheidsgraden.

Uit de pilots en ervaring blijkt dat de kosten voor het verminderen van de faalkans variabel is per kade. Het verminderen van de faalkans noemen we risicoreductie. In onderstaande tabel zien we de term risicoreductie in de afleiding van de minimale baten-kosten verhouding naar het overstromingsrisico. Als we ruimte willen om de variabiliteit van de risicoreductie te verwerken, moeten we de norm dus beschrijven als een minimale baten-kosten verhouding.

Tabel 6-1 Normbeschrijving, toetseis en de aanname om de ene normbeschrijving in de andere te vertalen.

Normbeschrijving	Toetseis	Aanname stap tussen beschrijvingen
Verantwoordingsplicht overstromingsrisico	Aantonen dat de kosten voor het verlagen van de overstromingskans niet opwegen tegen de baten.	
	Verlaging overstromingskans kan zowel door versterking waterkering als door beheer, onderhoud en calamiteitenzorg.	Alleen de kosten voor de versterkingsmaatregel en de baten van de risicoreductie worden tegen elkaar afgewogen.
Minimale baten-kosten verhouding	1,0 ($B/K > 1$) De contante waarde van de baten van een dijkversterkingsmaatregel (de risicoreductie) moet groter zijn dan de contante waarde van de kosten (kosten versterking incl. capaciteit om te berekenen en grondonderzoek)	Overige kosten en baten tellen niet mee.
		Gelijke kosten van risicoreductie.
Overstromingsrisico	De verwachtingswaarde van het jaarlijkse overstromingsrisico moet kleiner zijn dan x miljoen euro.	Gelijke gevolgen van de overstromingsgebeurtenis.
Overstromingskans	1/500 [1/jaar] De kans op overstroming moet kleiner zijn dan x	Risico = kans x gevolg
		Gelijke verhouding tussen de kans op overstroming en de kans op overbelasting.
Overschrijdingskans	1/100 [1/jaar] De kering moet een waterstand veilig kunnen keren die een overschrijdingskans bezit hoogstens x	

7 Conclusies

Dit hoofdstuk geeft de conclusies het onderzoek naar de gevolgen van het verbeteren van de veiligheidsbenadering van de regionale keringen.

Het verbeteren van de veiligheidsbenadering is voornamelijk het beter in kaart brengen van de gevolgen van een overstroming (gemeden kosten) en het meewegen van de investering (kosten) om een waterkering aan de norm te laten voldoen.

Daarnaast bestaat de wens aan herleidbare vertaaltappen tussen het overstromingsrisico en de overstromingskans, en de overstromings- en overschrijdingskans. Als deze vertaaltappen herleidbaar zijn en door waterkeringbeheerders zelfstandig kunnen worden doorlopen, is er ruimte om te normeren op een andere normbeschrijving. Dit geeft waterkeringbeheerders meer vrijheidsgraden voor keuzes en optimalisaties.

Dit vraagt om het nemen van besluiten, opstellen van methodes en het verder onderzoeken van de gevolgen van de toepassing van een verbeterde veiligheidsbenadering.

In beginsel impact-arm

Het verbeteren van de veiligheidsbenadering vereist in principe geen andere manier van rekenen. De huidige overschrijdingskans past binnen de verbeterde veiligheidsbenadering. Hiermee blijven de reeds gemaakte stabiliteitsberekeningen bruikbaar.

De overschrijdingskansbenadering blijft hanteerbaar als toetseis. Een overschrijdingskans is een afgeleide van een overstromingskans, dat op haar beurt weer een afleiding is van het overstromingsrisico. De overschrijdingskans waaraan nu getoetst wordt, kan blijven bestaan als afgeleide van een andere normbeschrijving.

Voortschrijdend inzicht leidt (mogelijk) tot wijzigingen

De overschrijdingskans die wordt afgeleid volgens de verbeterde veiligheidsbenadering wijkt mogelijk af van de overschrijdingskans die nu geldt. Een verbeterde manier van het bepalen van de gevolgschade, leidt waarschijnlijk tot een andere gevolgschade. En het herleidbaar maken van de vertaaltappen tussen de normbeschrijvingen, leidt mogelijk tot een andere vertaling. We willen nu juist verbeteren zonder de ballast van 'geen trendbreuk'.

Het is nu niet te bepalen of de huidige norm hoger of lager is. Hiervoor moeten vele bouwstenen uit het hoofdstuk 3 Gevolgen als actielijst gerealiseerd worden en vervolgens lokaal toegepast worden.

8 Procesmatig advies

Dit rapport toont aan dat er nog een hoop bouwstenen missen (zie Hoofdstuk 3 Gevolgen als actielijst). Er moeten besluiten worden genomen over (de uitgangspunten van) methodes, deze methodes moeten opgesteld worden en geïntroduceerd bij de gebruikers.

Het advies is om te starten met het opstellen van een helder proces met SMART-afspraken en duidelijke deadlines voor mijlpalen. De mijlpalen zijn momenten waarop de richting van het vervolgonderzoek wordt gekozen. Wees helder wie op welke mijlpaal een besluit neemt (stuurgroep, BGT, BGV, projectteam) en welke beslisinformatie nodig is. Het pad naar de volgende mijlpaal moet (voldoende) helder zijn door concreet te zijn welke beslisinformatie nodig is om bij de volgende mijlpaal weer een besluit te kunnen nemen.

Een helder proces met SMART-afspraken is bij deze ontwikkeling extra belangrijk omdat de projectteam erg klein is (1-3 personen) en de groep met (sturende) stakeholders (in de vorm van BGV&BGT¹ en een afvaardiging hiervan in de werkgroep veiligheidsbenadering) erg groot. De uitkomst van deze ontwikkeling kan een enorme impact hebben op zowel de norm- als kaderstellende partij als de waterkeringbeheerders.

Ook is meer aandacht nodig om de (sturende) stakeholders te voorzien van de kennis om hun rol goed te nemen. Een 'college veiligheidsbenadering', waarin van kop tot staart de veiligheidsbenadering op een simpele manier wordt uitgelegd, is hiervan een mooi voorbeeld.

De inhoudelijke adviezen volgen uit de impactanalyse, een project dat parallel loopt aan het schrijven van dit rapport.

9 Literatuurlijst

[IPO, 1999]

IPO-richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden, Interprovinciaal Overleg, 1999

[Provincies, 2014]

Uitvoeringsbesluit regionale waterkeringen West-Nederland 2014, Gedeputeerde Staten van Noord-Holland, van Zuid-Holland en van Utrecht, 08-07-2014, gepubliceerd in Provinciaal blad 2014, 87

[Stowa, 2009]

Materiaalfactoren boezemkaden, ORK 05-2009, Stowa, 2009

[Stowa, 2015]

Leidraad toetsen op veiligheid regionale keringen, STOWA 2015-15, Stowa, Interprovinciaal Overleg en Unie van Waterschappen, 2015

[Stowa, 2020]

De veiligheidsbenadering van regionale keringen. Ontstaan, achtergronden en toepassing van de huidige veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen, rapport 2020-07, Stowa, 2020

[Stowa, 2021]

Veiligheidsbenadering regionale keringen. Casus Groote of Achterwaterschap – Alblasserwaard Vijfheerenlanden, rapport 2021-06, Stowa, 2021

[Stowa, 2022]

Actualisering IPO-schadetabel regionale keringen, Stowa, 2022

[Stowa, 2023]

Veiligheidsbenadering regionale keringen: conclusie pilots, Stowa, 2023

[TAW, 1993]

Systematisch kade-onderzoek: de resultaten, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, juni 1993

Bijlage 1: Input vanuit toezichthouders

<p>Datum: 21-10-2022 Aanwezig: Bert Bulsink (Provincie Groningen), Pim Beerling (Provincie Gelderland), René Piek (Provincie Zuid-Holland), Thedros Haileyesus (ILT), Lindert Ambagts (DGWB), Henk van Hemert (Stowa) (eerste 30 minuten), Evelien van der Heijden (Stowa) De genodigden zijn BGV-(agenda)lid.</p> <p>Na de inleiding vrij in gesprek over de meningen, zorgen en gedachtes bij het aanpassen/verbeteren van de veiligheidsbenadering.</p> <p>De hiernaast gepresenteerde figuur hielp ons om de normbeschrijvingen consistent te benoemen.</p>	Niveaus van normeren	Aanname / vertaling tussen normniveau
	1. Verantwoordingsplicht overstromingsrisico	Alleen meewegen kosten versterkingsmaatregel en baten risicoreductie
	2. Minimale baten-kosten verhouding (+ LIR)	Vastzetten kosten risicoreductie
	3. Maximaal overstromingsrisico	Vastzetten gevolg overstromingsgebeurtenis
	4. Maximale overstromingskans	Gelijke verhouding kans overstromen en overbelasten
	5. Maximale overschrijdingskans / overbelastingskans	Vastzetten faalkansverdeling
	6. Doorsnede eis per faalmechanisme	
$\text{Risico} = \text{kans} \times \text{gevolg}$		

Waterwet schrijft normeren van waterkering voor, niet het beschermde gebied

De Waterwet schrijft voor dat de toezichthouder de waterkering normeert. Bij normeren op niveau 3 of hoger, wordt het beschermde gebied genormeerd. Als hiervoor wordt gekozen, moet de wet aangepast worden.

Behoeftte aan beschouwen overlijden door falen regionale keringen en combinatie primaire kering

In het westen van Nederland kan falen van een regionale waterkering leiden tot het overlijden van personen. De jaarlijkse kans dat een denkbeeldig persoon op een bepaalde locatie komt te overlijden door een overstroming is het Lokaal Individueel Risico (LIR). In Nederland is het LIR maximaal 10^{-5} .

Bij het normeren van primaire keringen is hiermee rekening gehouden. Bij regionale keringen is het LIR nog niet verwerkt.

In sommige polders kunnen personen overlijden door overstroming van zowel een primaire als een regionale kering. De normering van deze primaire en regionale keringen moet zo worden afgestemd, dat het LIR voor de personen in deze polder maximaal 10^{-5} is.

Fijn dat totale gevolgschade wordt meegenomen

De toezichthouders zijn positief over het meenemen van de totale gevolgschade.

Houd rekening met de verschillende typen regionale waterkeringen

De methode moet ook (makkelijk) toepasbaar zijn op regionale rivierdijken. Er spelen andere factoren bij hellende beekdalen dan in platte polders.

Zorgen over inefficiëntie

Voorkom dat het een te grote rekenanalyse wordt.

En ga goed na welke gevolgen het heeft voor de verbeteropgave. Een ander niveau van normeren mag niet leiden tot een veel grotere verbeteropgave.

Vragen en opmerkingen over toetsing

Kies goed welke zaken je probabilistisch wil invoeren voor regionale keringen. Welke zaken vormen een risico?

Wordt de waterstand een stochast of een determinist? En hoe ga je hierbij om met beheersmaatregelen. Bij een regionaal systeem heb je veel meer beheersmogelijkheden dan bij primaire keringen.

Verwerk je de kansen van windrichting en scheefstand?

Overlopen is niet perse falen. Neem wel het effect op de freatische lijn mee.

Hoe verwerk je het lengteeffect?

Wat is nodig om van een trajecteis naar een eis op doorsnedeniveau te komen?

Wees realistisch. Kies een methode die recht doet aan het risico.

Het indelen van trajecten gebeurt o.b.v. gevolgschade en hydraulische belasting.

Bij Hunze en Aa's is al een regionale kade goedgekeurd op overstromingskans.

Reeds voldoende ruimte voor ruimtelijke ontwikkeling

De veiligheidsbenadering hoeft op korte termijn geen aanvullende ruimte te geven om ruimtelijke ontwikkeling en meerlaagse veiligheid beter af te wegen. Bij het periodiek normeren houdt de toezichthouder al rekening met toekomstige ontwikkelingen.

Provincie Noord-Holland werkt aan een tool om inzichtelijk te maken waar welke (type) ruimtelijke ontwikkeling verstandig is. Ook loopt een onderzoek naar een gebiedsnorm.

Beide ontwikkelingen zijn interessant en hebben mogelijk effect op de veiligheidsbenadering in de toekomst. Op het moment geen rekening mee houden.

In tijden van maatgevende belasting

Zorg voor inzicht in de faalkans van verschillende faalmechanismen bij verschillende belastingen. Door een (opgeboste) overstromingskans verliest de waterkeringbeheerder dit inzicht.

Hanteren van een overstromingsrisico is handig om te communiceren met de veiligheidsregio. Andere partijen spreken vaak in risico's en niet in kansen.

Voorkeuren toezichthouders

De voorkeuren van de aanwezige toezichthouders verschillen van normeren op niveau 3. Maximaal overstromingskans tot 5. Maximale overschrijdingskans.

De twee toezichthouders met voorkeur voor normeren op niveau 5, willen ruimte voor ervaring en maatwerk op niveau 3 en 4. Er zijn twee toezichthouders met voorkeur voor normeren op niveau 4. Maximale overstromingskans.

De laatste toezichthouder stelt voor om te normeren op niveau 3. Hij stelt voor om te onderzoeken welke norm volgt als je de afleiding start op niveau 2. Minimale baten-kosten verhouding⁹.

Vervolgens vertaal je de norm op niveau 3 in IPO-tabellen zoals nu gangbaar is.

⁹ Voorkom onrealistisch hoge normen. Onderzoek toont aan dat de extra kosten om aan een hogere norm te voldoen gering zijn.

Veiligheidsbenadering regionale keringen

Pilot Boezemkade - stedelijk

Opdrachtgever



STOWA



Veiligheidsbenadering regionale keringen



Pilot Boezemkade - stedelijk

Conceptrapport

Auteurs

Mick van Montfoort

Bas Kolen

Bastiaan Kuijper

PR4503.10

7 februari 2022

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Bouwstenen	2
1.3	Uitgangspunten pilot	3
1.4	Leeswijzer	3
2	Beschrijving casusgebied	5
2.1	Locatie	5
2.2	Watersysteem	5
2.3	Type kering	6
3	Gevolgenbepaling	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Uitgangspunten gevolgenbepaling	7
3.3	Gevolgen bij hoogwater	11
3.4	Andere belastingsituaties	16
3.5	Reflectie op gevolgenbepaling	17
4	Systeemmaatregelen	19
4.1	Inleiding	19
4.2	Dichten bres	19
4.3	Inzetten maalstops	21
4.4	Compartimenteren boezem	22
5	Bepalen overstromingskans	23
5.1	Inleiding	23
5.2	Aanpak	23
5.3	Screening	24
5.4	Beoordeling hoogte	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
5.5	Basis fragility curves en likelihood ratios	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
5.6	Probabilistische berekening met bewezen sterkte	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
5.7	Faalkans dijktraject	43
5.8	Reflectie op gehanteerde aanpak	45
6	MKBA	49
6.1	Inleiding	49
6.2	Ontwerpnorm	49
6.3	Toetsnorm	51
6.4	Relatie tussen schade en optimale overstromingskans	52

6.5	Gevoeligheidsanalyse	52
7	Conclusie en reflectie	59
8	Referenties	60

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Nederlandse waterkeringsstelsel bestaat onder andere uit primaire, regionale en overige keringen. Voor de primaire waterkeringen is recent (2017) overgestapt van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering per dijktraject. Voor regionale keringen wordt momenteel uitgegaan van een overschrijdingskansbenadering. Voor de regionale keringen is verkend op welke wijze de vigerende veiligheidsbenadering kan worden aangepast. Op basis van die verkenning is geconcludeerd dat een regionale benadering wenselijk is, die recht doet aan de verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen. Ten behoeve van de invulling van de specifieke regionale benadering zijn vier pilots uitgevoerd, waarin een top 4 met denkbare aanpassingen zijn uitgetoetst. Voor een goed landelijk beeld zijn hiervoor 2 typen regionale keringen beschouwd, en 2 typen beschermde gebieden. Aldus resulteren 4 pilots, te weten:

- Boezemkade – landelijk: een kade langs een boezem die een landelijk gebied beschermt;
- Boezemkade – stedelijk: een kade langs een boezem die een stedelijk gebied beschermt;
- Regionale rivier – landelijk: een kering langs een regionale rivier die een landelijk gebied beschermt;
- Regionale rivier – stedelijk: een kering langs een regionale rivier die een stedelijk gebied beschermt.

Onderzoeksvragen

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de aanpassing van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. Daartoe zijn de volgende denkbare aanpassingen onderzocht:

- normeren:
 - o uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming, zowel binnen als buiten het overstroomde gebied;
 - o rekening houden met maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
 - o medegebruik: kan medegebruik maatgevende eisen stellen aan de kering die moeten worden meegewogen bij de normstelling van de kering uit oogpunt waterveiligheid;
 - o de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses);
- toetsen:
 - o werkwijzen voor de toetsing.

Afhankelijk van de aard van de pilot zijn binnen de uitwerking de accenten op verschillende onderdelen gelegd. Zo is in één pilot veel aandacht besteed aan het rekening houden met slachtoffers, terwijl in een andere bijvoorbeeld de meerwaarde van een gedifferentieerde (per faalmechanisme) normering. Ook zijn de wijzen waarop is geverifieerd op de sterkte van de kering aan de norm voldoet op verschillende wijzen uitgewerkt, teneinde de bruikbaarheid van enkele (internationale) werkwijzen voor zo'n verificatie te verkennen. Hoewel de pilots dus generiek van opzet zijn, verschillen het detailniveau waarin de onderzoeksvragen zijn uitgewerkt.

Disclaimer

Voor de uitwerking van de pilots is gebruik gemaakt van werkelijke dijkvakken en beschermde gebieden. Het doel van de pilots is de toegevoegde waarde, de haalbaarheid en de consequentie van verschillende aanpassingen van de toets- en normeringsmethodes te onderzoeken. Het verkrijgen van een gedetailleerd en accuraat beeld van de actuele waterveiligheid in de pilotgebieden was nadrukkelijk niet het doel. Uit oogpunt van doelmatigheid van de uitwerking zijn uitgangspunten soms vereenvoudigd of zijn (soms grove) aannamen gedaan, daar waar dat acceptabel was uit oogpunt van de doelstelling van de pilots. Daarmee hebben de resultaten zoals de optimale normen en het aangetoonde veiligheidsniveau geen betekenis voor de beschouwde pilotgebied. Benadrukt wordt daarom dat geen van de conclusies uit dit rapport gebruikt kunnen worden om conclusies aan te verbinden over de beschouwde pilotgebieden.

Deze rapportage beschrijft de uitwerking van één van de pilots, de casus Boezemkade - stedelijk. De achterliggende methode bij deze uitwerking is beschreven in een bouwstenenrapport [zie document 3 van deze serie], waar in dit rapport naar wordt verwezen.

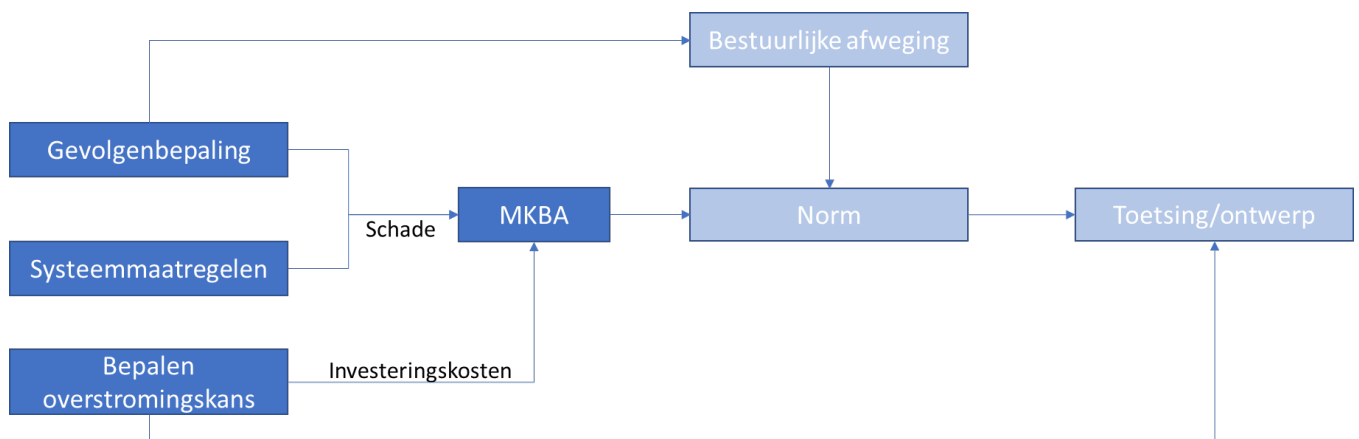
1.2 Bouwstenen

In dit rapport zijn de volgende bouwstenen met betrekking tot de veiligheidsbenadering uitgewerkt voor casus Boezemkade - stedelijk:

- **Gevolgenbepaling:**
Hierbij is onderzocht welke gevolgen optreden (schadebedrag, slachtoffers en getroffen) bij een overstrooming/dijkdoorbraak voor casus Boezemkade - stedelijk. Hierbij kijken we breder dan in eerdere normeringsstudies: we beschouwen niet alleen de schade in een overstroomd gebied, maar bijvoorbeeld ook schade aan het boezemstelsel en schade in naastgelegen polders door maalstops.
- **Watersysteemmaatregelen:**
Onderzocht is of en op welke wijze de inzet van systeemmaatregelen een beperkende invloed heeft op de hoeveelheid schade bij een dijkdoorbraak, en of dit kan leiden tot een andere norm.
- **Bepalen overstromingskans:**
Hierin zijn verschillende rekenmethodes voor het bepalen van de faalkans van de kering uitgewerkt (van grof naar fijn) en toegepast op de casus Boezemkade - stedelijk.

- Kosten-baten analyse:
De pilot sluit af met een MKBA (maatschappelijke kosten-baten analyse), waarin is gezocht naar de kosten-optimale norm (minimalisatie van de totale kosten).

Figuur 1 illustreert welke rol bovenstaande bouwstenen spelen binnen de veiligheidsbenadering. De gevolgenbepaling en systeemmaatregelen bepalen samen het totale schadebedrag dat als input dient in een MKBA. De bouwsteen 'bepalen overstromingskans' geeft een beeld van de omvang van maatregelen die nodig zijn om de kering te versterken tot aan een bepaalde norm, en de bijbehorende investeringskosten, die weer dienen als input voor de MKBA. Uit de MKBA volgt een kosten-optimale norm. In een bestuurlijke afweging, op basis van de kosten-optimale norm en eventuele aanvullende gevolgen van een overstroming (die niet zijn meegenomen in de MKBA), wordt de norm van de kering vastgesteld. In een toekomstige toetsing of ontwerp wordt de faalkans van de kering bepaald en vergeleken met deze norm. De bouwstenen die we in deze pilot beschouwen zijn donkerblauw gekleurd.



Figuur 1 Overzicht bouwstenen binnen veiligheidsbenadering.

1.3 Uitgangspunten pilot

In de uitvoering van de pilot zijn enkele generieke uitgangspunten gehanteerd:

- De achterliggende gedachte bij de pilot is dat we werken van grof naar fijn. Het doel is niet om alle bouwstenen tot in detail uit te werken, maar juist om het eenvoudig te houden, en alleen complexere analyses uit te voeren wanneer dit nodig is.
- Deze pilot is niet geschreven als een stappenplan dat altijd gevolgd moet worden, maar geeft vooral voorbeelden van de uitwerking van de verschillende bouwstenen.
- Het doel van de pilot is niet om te komen tot absolute antwoorden (norm, overstromingskans) voor de casus Boezemkade - stedelijk. Daarom zijn regelmatig aannames gedaan, om de analyses te vereenvoudigen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt het casusgebied van deze pilot beschreven. Hoofdstuk 3 bevat de uitwerking van de gevolgenbepaling en hoofdstuk 4 de uitwerking van de systeemmaatregelen. In hoofdstuk 5 is de overstromingskans van de kering bepaald, en in hoofdstuk 6 een MKBA uitgevoerd. Hoofdstuk 7 bevat een algemene conclusie en reflectie op de uitgevoerde pilot.

2 Beschrijving casusgebied

2.1 Locatie

Deze rapportage beschrijft de uitwerking van de pilot "Boezemkade – stedelijk", deze casus is geïnspireerd op de locatie Ommoord. Ommoord is een wijk in het noordwesten van het Rotterdamse stadsdeel Prins Alexander, met ruim 25.000 inwoners. De wijk grenst aan noordelijke zijde aan de rivier de Rotte. Figuur 2 toont (in rood) de ligging van de regionale kering, die de wijk Ommoord beschermt tegen een overstroming vanuit de Rotte. De kering ligt in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard (HHSK).

De kering die in de figuur rood is getoond, met een lengte van 2500m, is in deze pilot beschouwd als één dijktraject, dat we 'dijktraject Ommoord' noemen. Achterliggende gedachte hierbij is dat een doorbraak van de kering ergens op dit traject min of meer dezelfde gevolgen heeft; bij een doorbraak ergens langs dit traject loopt de wijk Ommoord onder water. Bij een doorbraak van de kering ten westen of ten oosten van het rode traject treedt een ander overstromingspatroon op, met andere gevolgen, waarbij dus ook een andere optimale norm (overstromingskans) hoort. Dit onder de aanname dat de verschillende trajecten onafhankelijk zijn. In deze pilot focussen we daarom enkel op het rode dijktraject.



Figuur 2 Regionale kering Ommoord (in rood).

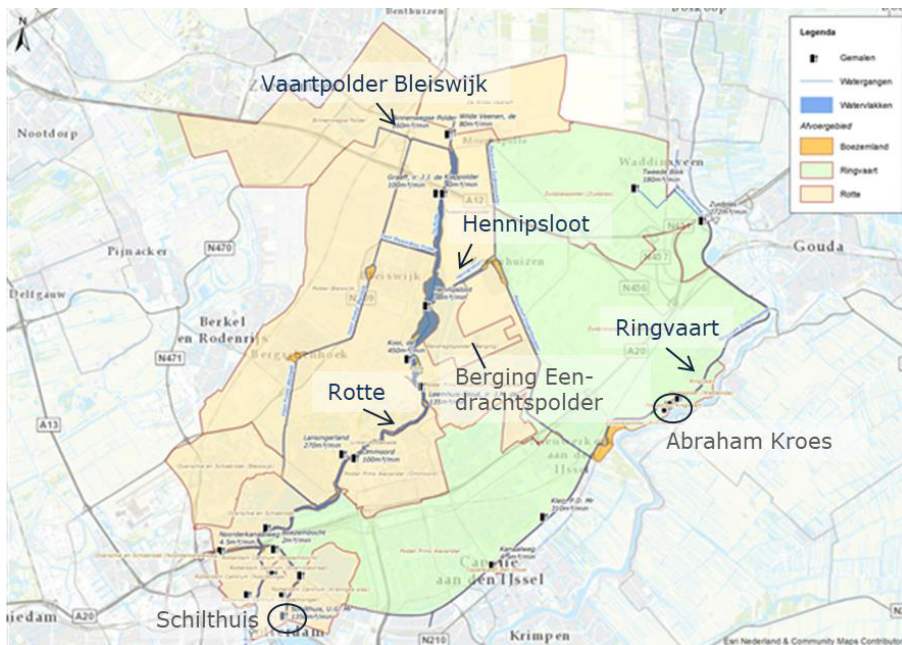
2.2 Watersysteem

De Rotte, waar de wijk Ommoord aan grenst, maakt onderdeel uit van een van de boezemsystemen van Schieland. De Rotte dient als boezem, die het teveel aan water uit de polders ten noorden van Rotterdam afvoert. Deze polders, zoals delen van Polder Prins Alexander, Polder Bleiswijk en de Binnenwegsepolder, lozen via gemalen op de Rotte. De Rotte zelf wordt bemalen

door gemaal Schilthuis, dat met een maximale capaciteit van 1350 m³/min uitmaalt naar het Boerengat.

Het Boerengat staat onder normale omstandigheden in open verbinding met de Nieuwe Maas, maar kan bij hoge waterstanden op de Nieuwe Maas worden afgesloten.

Figuur 3 toont het boezemstelsel van de Ringvaart en de Rotte.



Figuur 3 Boezemstelsel Ringvaart en Rotte [HKV, 2020].

2.3 Type kering

Dijktraject Ommoord is een boezemkering, omdat deze langs boezem de Rotte ligt. Het betreft daarom een zogenaamde 'natte' kering, die permanent water keert. De kering is genormeerd met IPO-klasse V, met een overschrijdingskansnorm van 1/1.000 per jaar. Deze normering is tot stand gekomen door eerst op basis van de richtlijn normering regionale keringen [STOWA, 2008] de norm te bepalen aan de hand van gevolgschade criteria, waarna middels een bestuurlijke afweging een definitieve norm is gekozen (die strenger kan zijn dan nodig is op basis van de gevolgschade), die is opgenomen in de verordening.

Zie Tabel 1 voor de verschillende IPO-klassen en bijbehorende gevolgschade criteria.

IPO-klasse	I	II	III	IV	V
Veiligheidsnorm [1/jaar]	1/10	1/30	1/100	1/300	1/1000
Gevolgschade criteria voor klasse [mln. Euro]	< 8	8 - 25	25 - 80	80 - 250	> 250

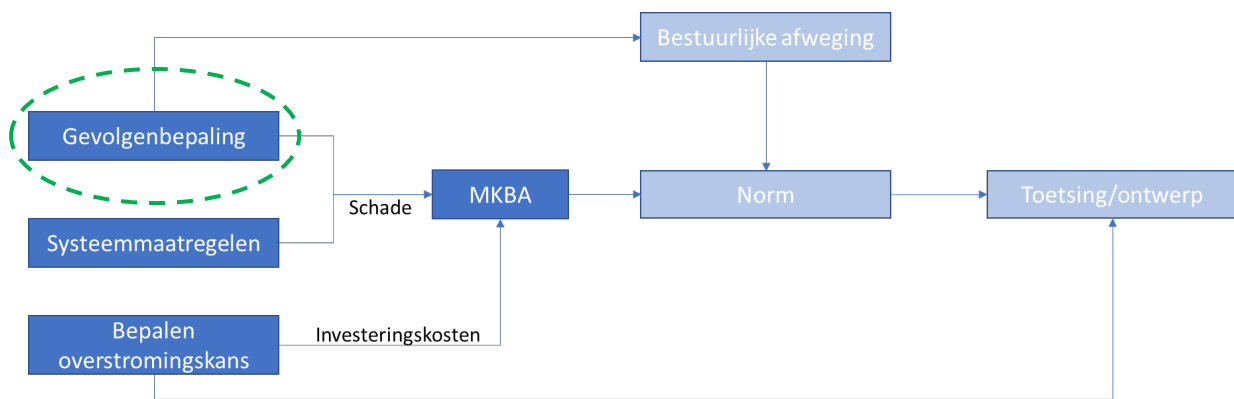
Tabel 1 IPO-klassen, dijktraject Ommoord valt in IPO-klasse V.

De kering in dijktraject Ommoord heeft over het algemeen een zeer flauw binnentalud, dat is aangelegd in een versterkingsproject in 2020. Op enige afstand van de kering (ca. 30m) is een binnendijkse sloot aanwezig. De ondergrond bestaat uit een dikke deklaag van ca. 15m dik, bestaande uit klei (grootste deel) en veen, met daaronder een zandpakket.

3 Gevolgenbepaling

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk gaan we in op het bepalen van de gevolgen van een overstroming/doorbraak van dijktraject Ommoord. Figuur 4 illustreert de rol van de gevolgenbepaling binnen de veiligheidsbenadering. De gevolgenbepaling speelt een belangrijke rol binnen de normering van een kering: enerzijds geldt de gevolgschade (schadebedrag) als input voor de MKBA, anderzijds kunnen aanvullende gevolgen (die niet in het schadebedrag zijn opgenomen) reden zijn om in een bestuurlijke afweging te kiezen voor een strengere norm dan de kosten-optimale norm die volgt uit de MKBA.



Figuur 4 Rol van gevolgenbepaling binnen veiligheidsbenadering.

In de volgende paragrafen is de gevolgenbepaling voor casus Boezemkade - stedelijk uitgewerkt. Voor een volledige achtergrond van de gevolgenbepaling wordt verwezen naar het methoderapport.

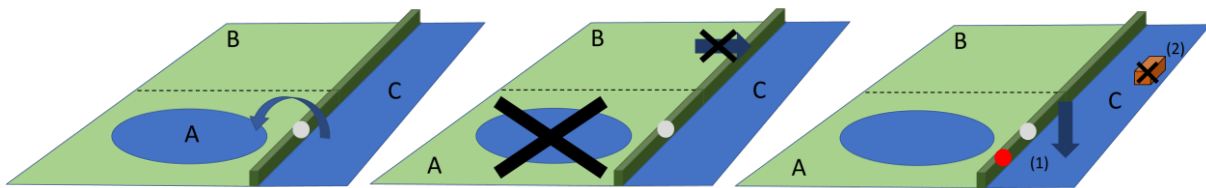
3.2 Uitgangspunten gevolgenbepaling

3.2.1 Werkwijze

De gevolgen bij een overstroming zijn onder te verdelen in drie gebieden, met bijbehorende gevolgencomponenten. Bij een keringdoorbraak loopt de achterliggende polder onder water, waardoor schade ontstaat, en waarbij mogelijk slachtoffers vallen en er getroffen zijn (A, links in Figuur 5). Mogelijk gevolg van de doorbraak is dat naastgelegen polders schade/hinder ondervinden als gevolg van keteneffecten¹, of doordat maalstops worden ingezet en deze polders niet meer kunnen afwateren (B, midden in Figuur 5). Daarnaast zijn er gevolgen voor de boezem en het boezemstelsel, in de vorm van schade aan het boezemstelsel door een daling van de waterstand, en uitval van functies m.b.t. het boezemstelsel (C, rechts in Figuur 5).

Voor een groslijst van mogelijke schadesoorten per gebied/component (A, B, C) verwijzen we naar het methoderapport.

¹ Deze keteneffecten kunnen verder rijken dan enkel de naastgelegen polders wanneer bijvoorbeeld belangrijke infrastructuur of een ziekenhuis uitvalt



Figuur 5 Gevolgen overstrooming. Links: gevolgen in overstroomde gebied (A), midden: gevolgen in naastgelegen polders (B), rechts: gevolgen voor boezemstelsel.

In de gevolgenbepaling is eerst de economische schade in de overstroomde polder (gebied A) bepaald, aan de hand van schademodellen (SSM-2017 of Waterschadeschatter). Deze schade noemen we de referentieschade. Daarnaast zijn het aantal slachtoffers en het aantal getroffen in gebied A bepaald.

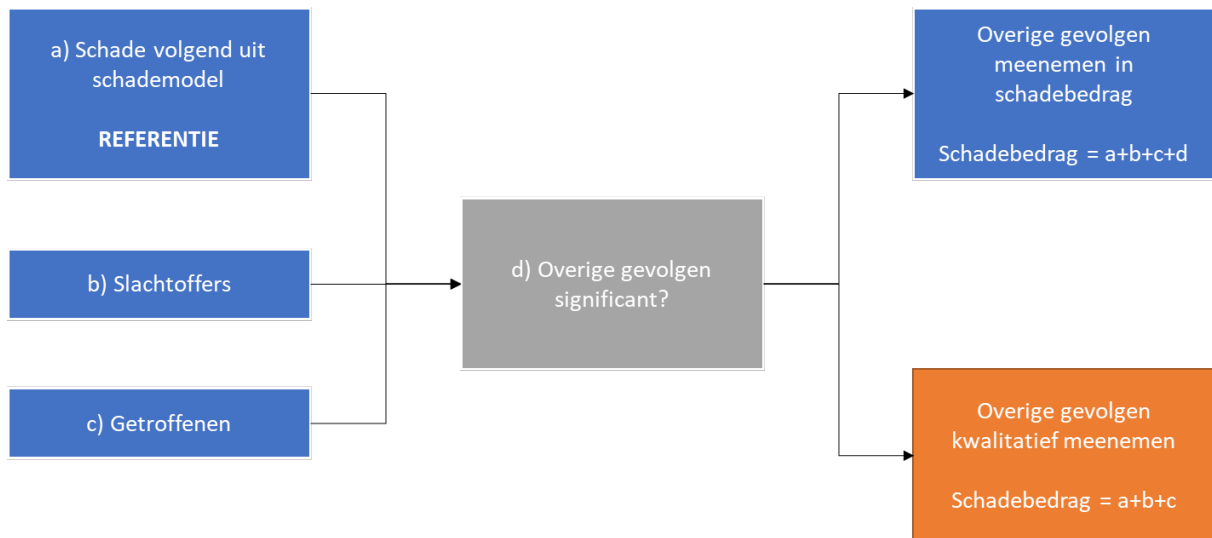
Vervolgens is bepaald of overige gevolgen significant zijn. Wij adviseren om de overige gevolgen als significant te beschouwen wanneer deze leiden tot een verdubbeling (factor 2) van het schadebedrag t.o.v. de referentieschade. We adviseren een factor 2 aan te houden omdat bij kleinere factoren onzekerheden in de gevolgenbepaling een relatief grote rol spelen. Daarnaast is een factor 2 kleiner dan de factor 3 die doorgaans wordt gehanteerd tussen verschillende normklassen, waardoor een factor kleiner dan 2 doorgaans niet zal leiden tot een andere normklasse. Onder overige gevolgen verstaan we:

- Schade in het overstroomde gebied (gebied A) die niet is meegenomen (of wordt onderschat) in de schademodellen, bijvoorbeeld wanneer er sprake is van schade aan vitale locaties/gebouwen/infrastructuur;
- Schade in naastgelegen polders (gebied B) door keteneffecten of maalstops;
- Schade aan boezem en boezemstelsel (gebied C).

We beschouwen of er reden is te veronderstellen dat deze overige gevolgen leiden tot een verdubbeling van het schadebedrag. Indien dit het geval is, worden de overige gevolgen in detail bepaald en gemonetariseerd, en opgenomen in het totale schadebedrag. Indien dit niet het geval is, worden de gevolgen niet in detail bepaald, maar kwalitatief bijgehouden in een lijst met 'overige gevolgen'. Deze kwalitatieve gevolgen worden weliswaar niet meegenomen in het schadebedrag dat als input geldt in de MKBA, maar kunnen wel reden zijn om op basis van bestuurlijke afweging te kiezen voor een strengere norm dan de kosten-optimale norm. Figuur 6 vat deze werkwijze samen.

Er zijn verschillende belastingsituaties (oorzaken) die kunnen leiden tot een overstrooming/doorbraak van de kering. Belangrijkste zijn hoogwater, storm en droogte. Bij deze drie belastingsituaties zijn de gevolgen bepaald. Uiteindelijk is de belastingsituatie die leidt tot de grootste gevolgen maatgevend², en daarmee leidend in het bepalen van de norm (MKBA). In deze pilot zijn eerst de gevolgen voor casus Boezemkade - stedelijk voor belastingsituatie hoogwater uitgewerkt, daarna is kwalitatief beschouwd hoe de gevolgen bij de andere situaties zich verhouden tot de hoogwater situatie.

² Dit betekent impliciet dat een maatregel (dijkversterking) alle drie de problemen moet 'oplossen', m.a.w. tot voldoende veiligheid moet leiden voor alle drie de belastingsituaties.



Figuur 6 Stappenplan gevolgebepaling.

3.2.2 Overstromings- en schadeberekeningen

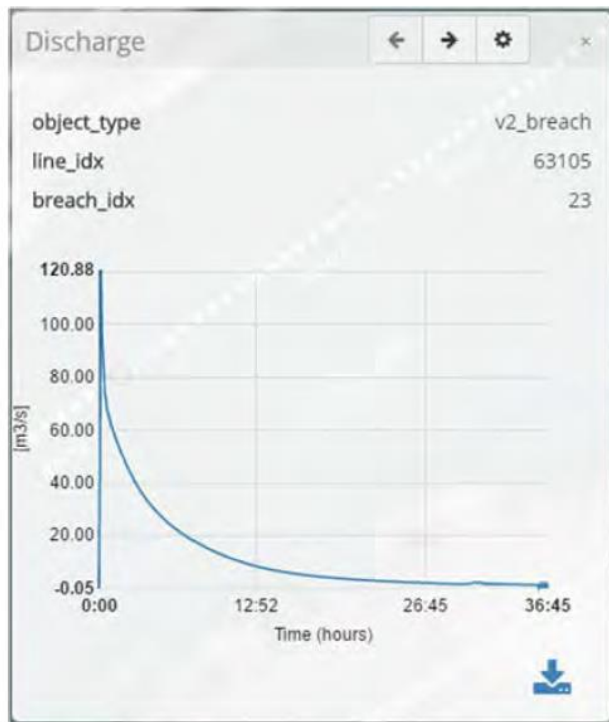
In 2018 zijn reeds overstromingsscenario's uitgewerkt voor de regionale keringen in het beheergebied van HHSK, waaronder dijktraject Ommoord. Hierbij zijn ook schadeberekeningen gemaakt met de Waterschadeschatter³. Voor alle achtergronden van deze berekeningen verwijzen we naar het bijbehorende rapport [Nelen en Schuurmans, 2018].

Ten behoeve van deze pilot zijn de bestaande overstromings- en schadeberekeningen als basis gebruikt. Hiervoor zijn de berekeningen bij breslocatie 10 Ommoord [Nelen en Schuurmans, 2018] gebruikt. Deze overstromingsberekeningen hebben een doorlooptijd van 36 uur. Na deze 36 uur is een evenwichtssituatie bereikt; er stroomt dan geen water meer de polder in. Figuur 7 toont de berekende waterdieptes na 16 uur. De doorbraaklocatie is aangegeven met de oranje stip. De meeste wateroverlast bevindt zich in het rode gebied. Dit is het gebied waar water op straat voorkomt, tot orde 50cm. Figuur 8 toont het bijbehorende verloop van het debiet door de bres.

³ De Waterschadeschatter is een web-based applicatie, ontwikkeld door STOWA. Dit model is geschikt om schade als gevolg van wateroverlast met geringe waterdieptes (tot enkele decimeters) te berekenen.



Figuur 7 Waterdieptes na 16 uur (oranje stip = doorbraaklocatie, rode cirkel geeft gebied met grootste waterdieptes aan) [Nelen en Schuurmans, 2018].



Figuur 8 Debiet door bres [Nelen en Schuurmans, 2018].

3.3 Gevolgen bij hoogwater

Hieronder zijn de gevolgen voor de belastingsituatie hoogwater uitgewerkt, op basis van de hierboven beschreven werkwijze en het stappenplan in Figuur 6. De hieronder genoemde stappen corresponderen met de letters in de figuur. Voor het complete stappenplan voor de gevolgenbepaling, waarin ook de overige gevolgen (stap d) in detail zijn beschreven, verwijzen we naar het methoderapport.

We merken op dat onderstaande uitwerking geen blauwdruk is voor de schadebepaling, maar een invulling van de methode beschreven in het methoderapport, specifiek voor de casus Boezemkade - stedelijk.

Stap a. Schade in gebied A (schademodel)

De economische schade in het overstroomde gebied (A) is in de beschikbare schadeberekeningen bepaald met de Waterschadeschatter.

Hieruit volgt:

- Schadebedrag = €22 miljoen
- Schadegebied = 175 ha

Voor een uitsplitsing naar verschillende schadecategorieën verwijzen we naar [Nelen en Schuurmans, 2018]. We merken op dat er geen opvallendheden zijn in deze schadecategorieën; er zijn geen speciale posten te ontdekken. Het grootste deel van de schade is afkomstig van industrie, winkels en woningen.

Stap b. Aantal slachtoffers

In [Nelen en Schuurmans, 2018] is het aantal slachtoffers berekend met het SSM schademodel⁴. Hieruit volgt een slachtofferaantal van 5. In het methoderapport is beschreven dat 5 slachtoffers of minder niet worden meegenomen in de gevolgenbepaling, omdat in dat geval onzekerheid en toevalligheden de uitkomst van het aantal slachtoffers domineren. Daarbij komt nog dat in de slachtofferberekening geen rekening is gehouden met evacuatie. Gezien de beperkte waterdieptes ligt het in de lijn der verwachting dat er helemaal geen slachtoffers zullen vallen, zeker wanneer we rekening houden met evacuatie.

Voor dijktraject Ommoord zijn slachtoffers dus als niet van toepassing beschouwd, en niet meegenomen.

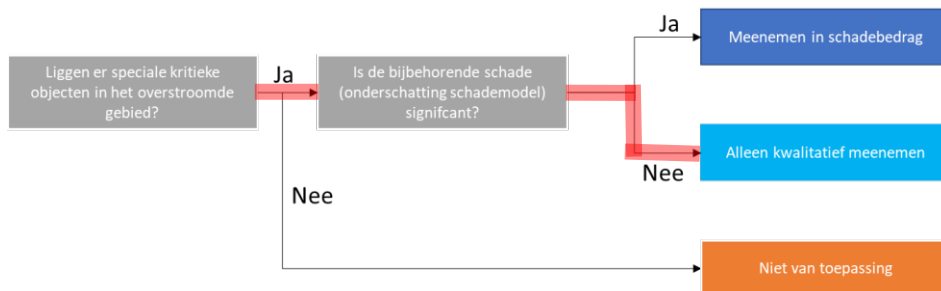
Stap c. Aantal getroffen in gebied A

Als uitgangspunt is gehanteerd dat het aantal getroffen gelijk is aan het aantal inwoners in het overstroomde gebied; dit zijn de personen die last hebben van natte voeten. Op basis van [Nelen en Schuurmans, 2018] telt het overstroomde gebied 6.545 inwoners. Het aantal getroffen in gebied A is daarmee 6.545.

Stap d.1. Overige gevolgen in gebied A

In deze stap is onderzocht of in het overstroomde gebied (gebied A) kritieke objecten liggen, waarvoor het schadebedrag volgend uit de Waterschadeschatter een onderschatting zou kunnen zijn. Zie Figuur 9 voor het uitgewerkte stappenplan. Het pad dat van toepassing is, is rood gemarkeerd. De motivatie volgt onder de figuur.

⁴ SSM-2017 (Schade en Slachtoffer Module) is ontwikkeld door Rijkswaterstaat om schade en slachtoffers te berekenen aan de hand van overstromingssimulaties. De module is voornamelijk geschikt voor situaties met grote waterdieptes.



Figuur 9 Stappenplan aanvullende gevolgen gebied A.

Mogelijk speciale kritieke objecten zijn geïdentificeerd op basis van risicokaart.nl. De volgende objecten zijn aanwezig in het overstromde gebied:

- Kwetsbare objecten: 9 scholen en 1 ziekenhuis
- Risicolocaties milieu: geen
- Rijksmonumenten of cultureel erfgoed: geen
- KRW-beschermde gebieden: geen
- Vitale infrastructuur: A20

Hierbij merken we meteen op dat nader onderzoek uitwijst dat het geen ziekenhuis betreft, maar een huisartsenpost. De scholen betreffen reguliere scholen.

Aan kwetsbare objecten is in de schadeberekeningen met Waterschadeschatter [Nelen en Schuurmans, 2018] al een schade opgenomen van €35.000 aan gezondheidszorg en €1.156.000 aan onderwijs. De aantallen en aard van de kwetsbare objecten (9 gemiddelde scholen en 1 huisartsenpost) geven geen aanleiding deze schade te corrigeren.

Belangrijke infrastructuur in het gebied die onder water komt te staan is de A20 bij het Cortlandt Aquaduct (zie gele cirkel in Figuur 10). Als gevolg hiervan zal verkeer worden gestremd.

In de schadeberekeningen met Waterschadeschatter is voor secundaire wegen een bedrag van €462.053 opgenomen. Voor primaire wegen, zoals de A20, is geen schade opgenomen. Dit kan worden verklaard door het feit dat indirecte gevolgen (zoals stremming) niet zijn meegenomen in het model. Hieronder geven we een schatting van de schade als gevolg van de stremming van de A20.

Via wegenwiki.nl is achterhaald dat in 2019 sprake was van 113.300 auto's per werkdag op de A20. In de 'City Deal Klimaatadaptatie' [Bas Kolen et al, 2019] is gerekend met een schadebedrag van €25 per voertuigverliesuur als kental. Wanneer we veronderstellen dat elke auto 1 uur moet omrijden als gevolg van stremming van de A20, resulteert dit in een totale schade van €2.825.000 per dag. Mogelijk ligt de werkelijke schade nog hoger, omdat er sprake is van keteneffecten: door stremming van de A20 en de auto's die moeten omrijden, is er een reële kans dat ook de nabijgelegen A4 en A12 verstopten, met schade als gevolg.

We merken op dat de schade door verkeersstremmingen erg onzeker is. Fundamentele vraag is daarom of deze schades zouden moeten worden meegenomen in het totale schadebedrag. In deze pilot is besloten de schade vooralsnog niet mee te nemen, maar de verkeersstremming van de A20 wel kwalitatief op te nemen in de lijst 'overige gevolgen'. In een later stadium dient een algemene beslissing te worden genomen over het wel of niet meenemen van verkeersstremmingen in het totale schadebedrag (indien significant).

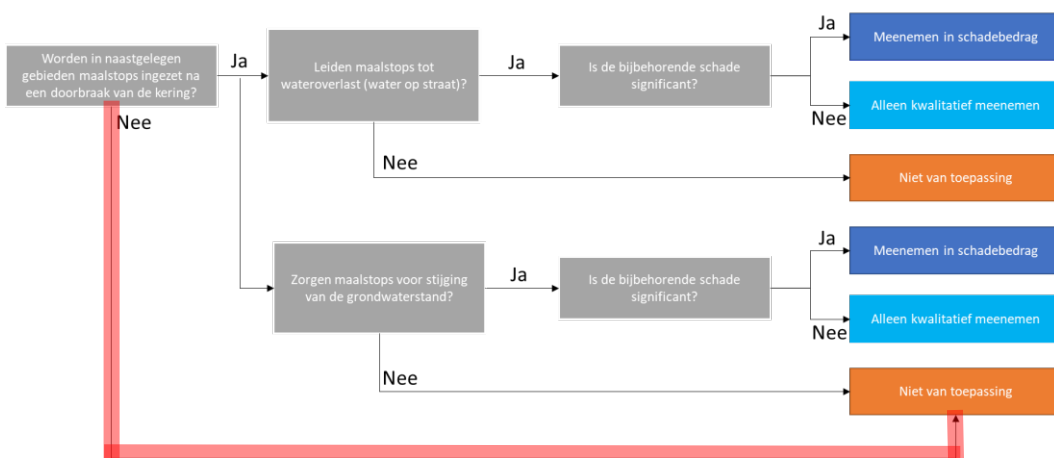


Figuur 10 Ligging Cortlandt aquaduct (gele cirkel).

Stap d.2. Gevolgen in naastgelegen gebieden (B)

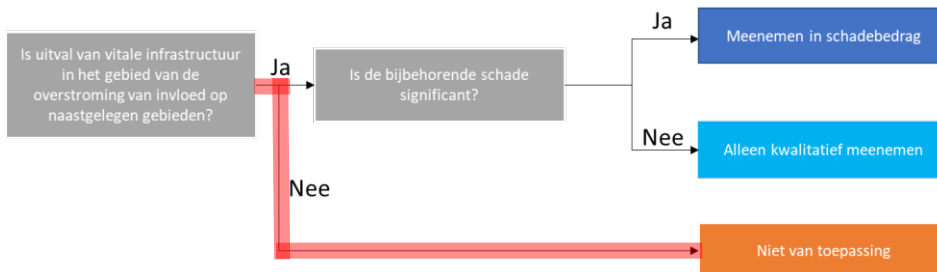
In deze stap is onderzocht of in naastgelegen gebieden sprake is van significante hinder en/of schade als gevolg van de overstroming in gebied A. Dit kan bestaan uit schade door maalstops of schade door uitval van vitale infrastructuur. Deze gevolgen worden beide doorlopen aan de hand van een eigen stappenplan. Deze zijn hieronder getoond, met daarbij de uitwerking voor pilot Boezemkade - stedelijk.

Figuur 11 toont het stappenplan voor schade door maalstops. De beheerder van HHSK geeft aan dat er geen plannen zijn voor het inzetten van maalstops bij een doorbraak van de kering. Op basis daarvan gaan we er in deze casus van uit dat geen maalstops worden ingezet in naastgelegen gebieden, waardoor geen rekening is gehouden met schade door maalstops. Voor toekomstige gevolgebepaling voor dijktrajecten raden we echter aan de afweging te maken niet enkel op basis van plannen en protocollen, maar in te schatten of het wel of niet voor de hand ligt dat maalstops worden ingezet.



Figuur 11 Stappenplan gevolgen door maalstops.

Figuur 12 toont het stappenplan voor schade door uitval van vitale infrastructuur. In het overstroomde gebied (A) ligt aan vitale infrastructuur enkel de A20, die gestremd wordt. Dit kan invloed hebben op omliggende gebieden (B). De bijbehorende gevolgen zijn echter al meegenomen in gebied A (stap d.1). Hierin zijn ook de gevolgen van omrijden meegenomen. Deze gevolgen worden hier niet nogmaals meegenomen. In het stappenplan is dit weergegeven door schade door uitval van infrastructuur hier als niet van toepassing te beschouwen.

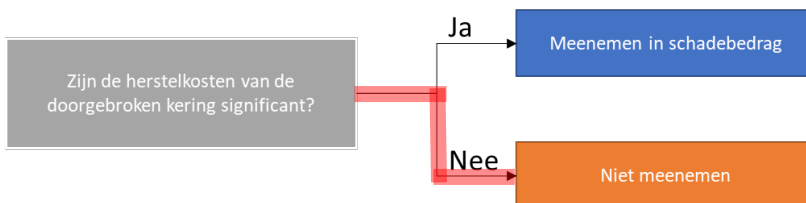


Figuur 12 Stappenplan vitale infrastructuur.

Stap d.3. Gevolgen voor boezem- en boezemland

In deze stap is onderzocht er sprake is van significante hinder en/of schade gerelateerd aan het boezemstelsel en boezemland. Deze schade kan bestaan uit de benodigde herstelkosten van de doorgebroken kering, schade aan belangrijke kabels en/of leidingen in de doorgebroken kering, uitval van functies gerelateerd aan het boezemsysteem en schade aan keringen elders in het boezemstelsel als gevolg van de waterstandsval na de doorbraak. Deze schades worden allen doorlopen aan de hand van een eigen stappenplan.

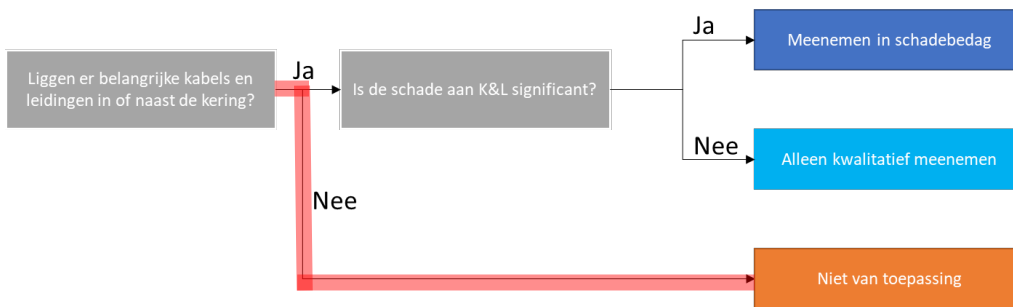
Figuur 13 toont het stappenplan voor de herstelkosten van de doorgebroken kering. Uitgaande van een grove schatting van herstelkosten van €10.000 per strekkende meter en een bres van 50m breed, is de verwachting dat de kosten van het herstellen van de doorgebroken kering niet significant zijn (herstelkosten €500.000, referentieschade €22 miljoen). Daarom worden deze niet meegenomen in het totale schadebedrag.



Figuur 13 Stappenplan herstelkosten doorgebroken kering.

Figuur 14 toont het stappenplan voor schade aan kabels en leidingen. In een strekking van ca. 1km rondom de doorbraaklocatie liggen enkel elektriciteitsleidingen nabij de kering. De verwachting is dat schade aan elektriciteitsleidingen beperkt is. Deze worden daarom niet aangemerkt als belangrijke kabels en leidingen. Schade aan kabels en leidingen is daarom niet significant, en wordt niet meegenomen.

We merken op dat schade aan kabels en leidingen pas relevant wordt wanneer belangrijke transportleidingen (gas, water) worden geraakt.



Figuur 14 Stappenplan schade aan kabels en leidingen.

Figuur 15 toont het stappenplan voor schade door uitval van functies van het boezemsysteem. De Rotte heeft een belangrijk aan- en afvoerfunctie van water. De achterliggende polders zijn vrijwel volledig afhankelijk hiervan. Door de doorbraak stroomt water Ommoord in, waardoor polders stroomafwaarts van Ommoord minder water aangevoerd krijgen. Vermoedelijk wordt dit pas een probleem wanneer de stremming van wateraanvoer lang duurt. Deze schade is waarschijnlijk niet significant ten opzichte van de referentieschade, maar wordt wel kwalitatief opgenomen in de lijst 'overige gevolgen'.

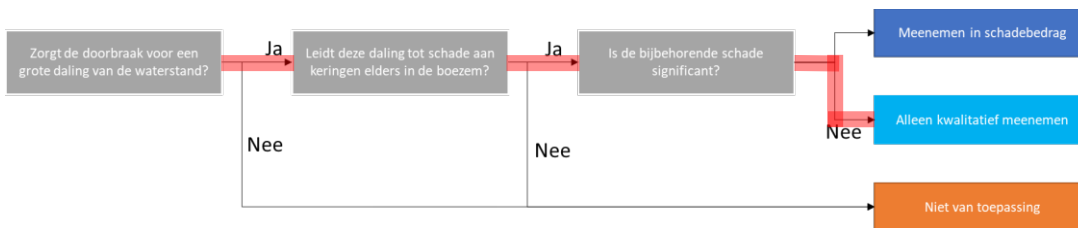
Wat betreft scheepvaart vindt er alleen pleziervaart plaats op de Rotte. Deze maakt deel uit van de vaarroute van de Schie via de Rotte en de Ringvaart naar de Hollandsche IJssel. Stremming van pleziervaart zal wel getroffen worden (mensen die niet kunnen varen), maar hier zijn waarschijnlijk geen grote kosten mee gemoeid, aangezien het enkel een vrijetijdsbesteding betreft. Deze schade is daarmee niet significant ten opzichte van de referentieschade, maar wordt wel kwalitatief opgenomen in de lijst 'overige gevolgen'.



Figuur 15 Stappenplan schade door uitval functies boezemsysteem.

Figuur 16 toont het stappenplan voor schade door waterstandsddaling. Figuur 8 (vorige paragraaf) toont het debiet door de bres. Het oppervlak onder de grafiek, het totaal ingestroomde debiet, bedraagt 1.800.000m³. Ervan uitgaande dat er geen water meer wordt aangevoerd, betekent dit dat 1.800.000m³ aan water uit de Rotte verdwijnt. Uitgaande van een oppervlak van 1.800.000m², op basis van beheerderskennis, betekent dit een waterstandsddaling van 1,0m. Hierbij is verondersteld dat zich geen verhanglijnen vormen.

De verwachting is dat een doorbraak leidt tot een waterstandsddaling van 1m over de hele Rotte (met een lengte van 48km). Op basis van expert judgement schatten we als bovengrens in dat dit leidt tot schade aan het buitentalud op 10% van het traject. Dit betekent dat over 4,8km het buitentalud hersteld moet worden. We schatten in dat de herstelkosten van het buitentalud €1.000/m bedragen, waarmee de totale schade op 4,8 miljoen € komt. We benadrukken dat dit een grove schatting van de bovengrens van de schade betreft. Deze schade is niet significant ten opzichte van de referentieschade, en wordt daarom niet in detail bepaald en meegenomen in het schadebedrag. Het risico op schade als gevolg van de waterstandsddaling wordt wel opgenomen in de lijst 'overige gevolgen'.



Figuur 16 Stappenplan schade door waterstandsdeling.

Overzicht gevolgen

Een overzicht van de gevolgen bij een overstroming/doorbraak van dijktraject Ommoord, voor de belastingsituatie hoogwater, is opgesomd in Tabel 2. Het totale schadebedrag bedraagt €22 miljoen. Dit is het bedrag dat als input wordt gebruikt in een MKBA. Conform de IPO-normering (zie Tabel 1) zou het dijktraject daarmee nog net in IPO-klasse II vallen. De kering is echter significant strenger genormeerd, met IPO-klasse V.

Naast het totale schadebedrag zijn een aantal gevolgen kwalitatief opgenomen in het overzicht. Deze komen niet terug in het schadebedrag dat in een MKBA wordt gebruikt om de optimale norm te bepalen. Ze kunnen echter wel reden zijn om op basis van een bestuurlijke afweging te kiezen voor een strengere norm dan de optimale norm volgend uit de MKBA.

Voor een aantal gevolgen die kwalitatief zijn opgenomen in het overzicht, is het schadebedrag niet in detail bepaald en niet meegenomen in het totale schadebedrag, omdat is ingeschat dat deze schades niet relevant zijn, d.w.z. niet leiden tot een minimaal factor 2 hogere schade (t.o.v. de referentieschade). De juistheid van deze inschatting is gecontroleerd door de schades cumulatief te beschouwen. Ook cumulatief leiden deze schades niet tot een minimaal factor 2 hogere schade, waardoor er geen aanleiding is het schadebedrag bij te stellen.

Soort schade	Monetair/ kwalitatief	Schade / gevolg
Schademodel (gebied A)	Monetair	€22 miljoen
Slachtoffers	N.v.t.	N.v.t.
Getroffenen	Kwalitatief	6.545 getroffen
Aanvullende gevolgen gebied A	Kwalitatief	Stremming A20
Aanvullende gevolgen gebied B	N.v.t.	N.v.t.
Aanvullende gevolgen gebied C	Kwalitatief	Verminderde wateraanvoer
		Uitval pleziervaart
		Schade door val boezempeil
Totaal schadebedrag (MKBA)		€22 miljoen

Tabel 2 Overzicht schade dijktraject Ommoord.

3.4 Andere belastingsituaties

Bovenstaand overzicht van gevolgen geldt voor de belastingsituatie hoogwater. Zoals eerder vermeld, beschouwen we nog twee andere belastingcombinaties: storm en droogte. Storm is voor de beschouwde casus niet relevant, omdat het een boezemstelsel betreft met gereguleerd peil en korte strijk lengtes. Droogte is wel relevant. In Tabel 3 zijn de gevolgen bij een doorbraak door droogte kwalitatief vergeleken met die bij hoogwater. Per gevolgcategorie is opgenomen of de

schade bij droogte groter of kleiner, aangeven met (++) t/m (--), waarbij ++ veel groter betekent, en -- veel kleiner.

Soort gevolg	Schade/gevolg bij hoogwater	Schade/gevolg bij droogte	Motivatie
Schademodel (gebied A)	€22 miljoen	-	Bij een droogtesituatie is de waterstand op de boezem lager, dus is sprake van minder instroom. Het verschil is waarschijnlijk beperkt.
Slachtoffers	N.v.t.	0	Bij een hoogwater situatie zijn slachtoffers niet van toepassing. Bij droogte kan enkel sprake zijn van minder slachtoffers, doordat er minder instroom van water plaatsvindt. In de droogtesituatie zijn slachtoffers daarom ook niet van toepassing.
Getroffenen	6.545	0	In de hoogwatersituatie is het aantal getroffen personen gelijkgesteld aan het aantal inwoners van het overstroomde gebied. Het overstroomde gebied verschilt waarschijnlijk niet in de droogtesituatie (enkel de waterdiepte), waardoor het aantal getroffen personen niet verandert.
Aanvullend gebied A	Kwalitatief gevolg: uitval A20	0/-	Mogelijk is in de droogtesituatie sprake van minder stremming van de A20, door de kleinere instroom van water.
Gebied B	N.v.t.	0	Schade in aangrenzende gebieden (B) is niet relevant bij hoogwater. Deze schade zal bij droogte zeker niet groter zijn, dus ook hier niet relevant.
Gebied C	Kwalitatieve gevolgen: - Verminderde wateraanvoer - Uitval pleziervaart - Schade door val boezempeil	++	In een droogtesituatie is de aanvoerfunctie van de Rotte van groot belang. Uitval van de wateraanvoerfunctie heeft dan grotere gevolgen dan in een hoogwatersituatie.

Tabel 3 Vergelijking schade bij hoogwater en bij droogte.

Op basis van de tabel zijn de gevolgen bij droogte over het algemeen redelijk vergelijkbaar met die bij hoogwater. Dit komt ook doordat de mogelijke waterstandsfluctuaties op de Rotte beperkt zijn (enkele dm). Het totale schadebedrag is bij hoogwater groter dan bij droogte. Daarom is het gevolgenoverzicht bij hoogwater (Tabel 2) als maatgevend, en daarmee leidend beschouwd. Als aanvulling hierop is in gebied C de verminderde wateraanvoer na een doorbraak als ernstiger ingeschat, omdat de gevolgen bij droogte groter zijn dan bij hoogwater. Bij hoogwater is deze verminderde wateraanvoer niet zo relevant, bij droogte kan dit wel degelijk tot grote hinder/schade leiden. Dit kan reden zijn om op basis van een bestuurlijke afweging te kiezen voor een strengere norm dan de kosten-optimale norm die volgt uit een MKBA.

3.5 Reflectie op gevolgenbepaling

De gehanteerde methode voor het bepalen van de gevolgen en schade van een potentiële overstroming/doorbraak is ervaren als relatief eenvoudig en goed toepasbaar. We kijken in deze

methode breder dan in eerdere normeringsstudies: we beschouwen niet alleen de schade in een overstroomd gebied, maar bijvoorbeeld ook schade aan het boezemstelsel en schade in naastgelegen polders door maalstops. Het grote voordeel van de toegepaste werkwijze is dat niet alle gevolgen in detail berekend en gemonetariseerd hoeven te worden. Alleen gevolgen die significant zijn, en kunnen leiden tot een andere normklasse, worden in detail bepaald. Overige gevolgen kunnen kwalitatief worden meegenomen. Vooraf beschouwen of gevolgen wel of niet significant zijn zorgt daarmee voor een doelmatige analyse. Na het uitvoeren van de MKBA (hoofdstuk 6) reflecteren we nogmaals op het benodigde detailniveau van de gevolgenbepaling.

Voor de gevolgenbepaling in het algemeen adviseren wij het volgende:

- We adviseren om de overige gevolgen – d.w.z. alle gevolgen die niet zijn meegenomen in de schade zoals berekend met het schademodel (referentieschade) - als significant te beschouwen wanneer deze leiden tot minimaal een verdubbeling (factor 2) van het schadebedrag t.o.v. de referentieschade;
- We adviseren om berekende slachtofferaantallen van 5 slachtoffers of minder niet mee te nemen in de gevolgenbepaling, omdat in dat geval onzekerheid en toevalligheden de uitkomst van het aantal slachtoffers domineren.

Ten slotte doen wij de volgende aanbevelingen voor vervolgonderzoek:

- In bovenstaande analyse is de Waterschadeschatter gebruikt voor het schademodel. Als alternatief model is SSM beschikbaar⁵. Over het algemeen geldt dat de Waterschadeschatter geschikt is voor het berekenen van schade bij waterdieptes tot enkele decimeters, en SSM voor significant grotere dieptes. Uit ervaring weten we echter dat de resultaten van beide modellen flink kunnen verschillen. Bovendien zijn de functies in de Waterschadeschatter niet volledig gevalideerd (de Waterschadeschatter wordt nog doorontwikkeld [Ambient, 2021]). Daarom is aanbevolen een nadere analyse uit te voeren naar de toepasbaarheid van beide modellen in verschillende situaties. Deze analyse is opgenomen in [HKV, 2022].
- In deze pilot is ervoor gekozen de schade als gevolg van uitval van belangrijke infrastructuur (in dit geval stremming van de A20) niet op te nemen in het totale schadebedrag, maar kwalitatief mee te nemen. Dit vanwege de grote onzekerheid in de bijbehorende schade. In een later stadium dient een algemene beslissing te worden genomen over het wel of niet meenemen van verkeersstremmingen in het totale schadebedrag (indien significant). Hierbij merken we op dat het zinvol is te beschouwen of een dergelijke schade niet voorkomen kan worden met relatief eenvoudige maatregelen. In het geval van pilot Boezemkade - stedelijk kan de stremming van de A20 voorkomen worden door het ophogen van de keringen langs het aquaduct.

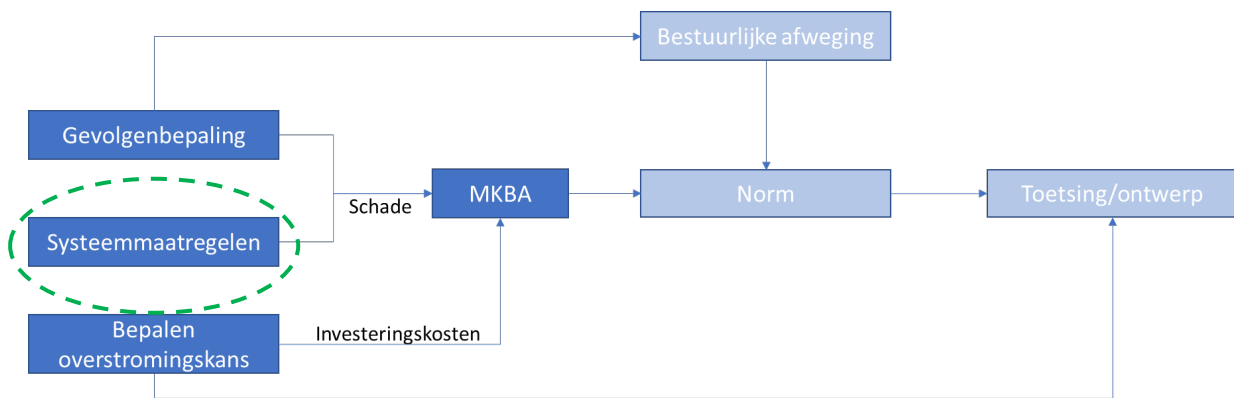
⁵ SSM-2017 is voor casus Boezemkade - stedelijk wel gebruikt voor het berekenen van de slachtoffers, maar enkel omdat de Waterschadeschatter geen slachtoffers berekend. SSM is in deze pilot niet gebruikt voor het berekenen van schade.

4 Systemmaatregelen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is onderzocht of en op welke wijze systeemmaatregelen kunnen worden ingezet tijdens dreigende hoogwatersituaties of bij een doorbraak van de kering, om zo gevolgen van een overstroming te beperken. Daarnaast is onderzocht of het inzetten van deze maatregelen kan leiden tot een andere norm voor de kering. Indien dit laatste het geval is, is het raadzaam betrouwbaarheidseisen te stellen aan deze systeemmaatregelen.

Figuur 17 illustreert de rol van systeemmaatregelen binnen de veiligheidsbenadering. Systeemmaatregelen kunnen de gevolgen van een doorbraak van de kering beperken, en daarmee het schadebedrag, dat als input geldt voor de MKBA, verkleinen.



Figuur 17 Rol van systeemmaatregelen binnen de veiligheidsbenadering.

Voor een overzicht van de verschillende systeemmaatregelen verwijzen we naar het methoderapport, waarin de verschillende systeemmaatregelen zijn opgesomd met hun voor- en nadelen. In deze pilot zijn de volgende systeemmaatregelen nader onderzocht:

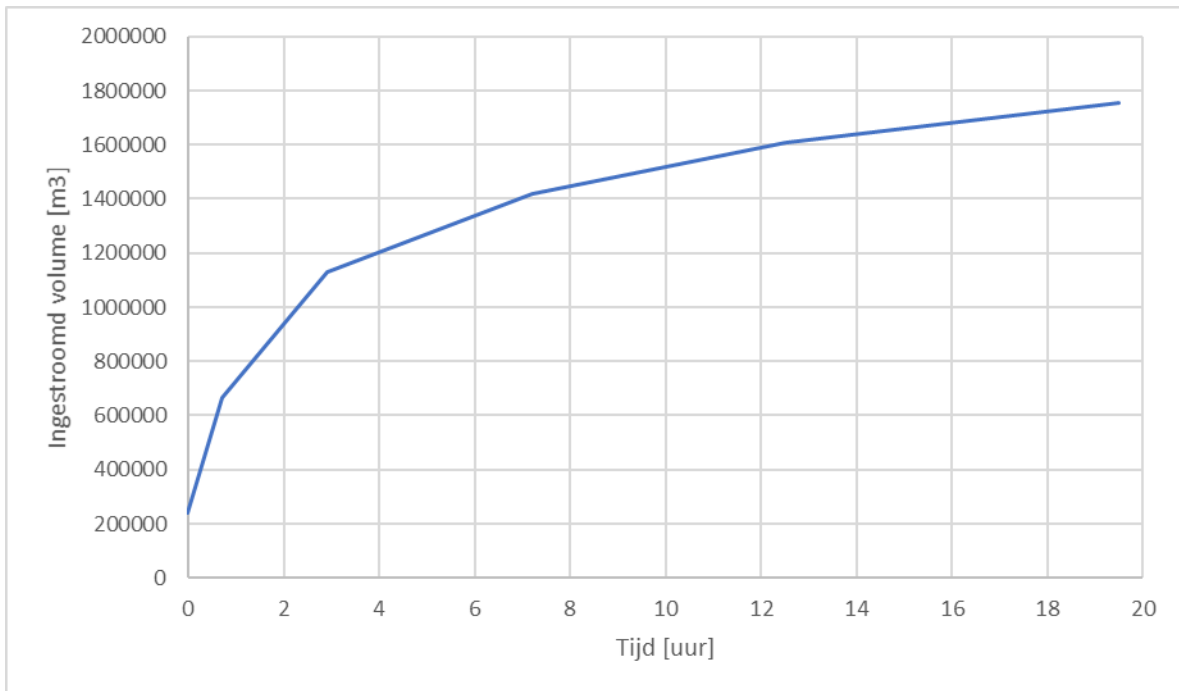
- Dichten van de bres;
- Inzetten maalstops;
- Compartimenteren boezem.

Voor deze drie maatregelen is onderzocht wat de invloed is op de mogelijke gevolgschade van een keringdoorbraak in de drie afzonderlijke gebieden (A, B en C, zie hoofdstuk 3). De overige systeemmaatregelen uit het methoderapport zijn niet van toepassing voor de casus Boezemkade - stedelijk.

4.2 Dichten bres

Het dichten van de bres (na een doorbraak van de kering) zorgt ervoor dat de instroom naar het achterliggende gebied stopt. Hieronder is de invloed van het dichten van de bres op de schade in de gebieden A, B en C bepaald.

In gebied A (overstroomde gebied) kan het dichten van de bres zorgen voor minder instroom van water, en daarmee voor minder wateroverlast en bijbehorende schade. Onderstaande figuur toont het cumulatieve ingestroomde watervolume, op basis van het debiet uit Figuur 8. In totaal stroomt ca. 1.800.000m³ water het gebied in. Op basis van gesprekken met de beheerder veronderstellen we dat het dichten van de bres binnen 6 uur niet realistisch is. Na 6 uur is ongeveer 1.300.000m³ water het achterliggend gebied ingestroomd. Voordat de bres gedicht kan worden, is het grootste deel van het water dus al ingestroomd. Het is daarom niet realistisch te veronderstellen dat de vermindering van de schade in gebied A significant (minimaal factor 2) is.



Figuur 18 Ingestroomd volume uitgezet tegen de tijd in uur.

Voor casus Boezemkade - stedelijk is de schade in gebied B (omliggende gebieden) niet relevant (zie hoofdstuk 3). De systeemmaatregel zorgt in elk geval niet voor hogere schade in gebied B, en heeft daarmee dus geen invloed op de schade in dit gebied.

In gebied C zijn enkele gevolgen kwalitatief meegenomen (zie hoofdstuk 3): schade aan keringen als gevolg van de val van het buitenwater, schade door uitval recreatievaart, en schade door verminderde wateraanvoer. Deze gevolgen zullen door het dichten van de bres iets lager uitvallen, maar gezien de grote instroom in de eerste 6 uur is de verwachting dat het verschil slechts beperkt is en daarmee niet relevant.

Op basis van bovenstaande kan worden geconcludeerd dat het dichten van de bres als systeemmaatregel niet leidt tot een significante schadevermindering, en daarmee niet gaat leiden tot een andere normklasse. De maatregel wordt dus niet meegenomen in de normering, maar kan in het geval van een doorbraak uiteraard wel worden ingezet om de schade te beperken.

4.3 Inzetten maalstops

Maalstops in aangrenzende polders kunnen leiden tot een verkleining van het watervolume in de Rotte, doordat deze polders niet meer afwateren. Hierdoor wordt mogelijk ook het instromend debiet na een doorbraak verkleind.

Voor een verkennende berekening is verondersteld dat bij het berekende instromend debiet uit Figuur 8 sprake is van een evenwicht tussen afwatering op de Rotte door poldergemalen en uitwatering op de Nieuwe Maas bij gemaal Schilthuis, en dat de gemalen allemaal maximaal afwateren. Bij het inzetten van maalstops wordt niet meer afgewaterd op de Rotte, maar wel nog uitgewaterd op de Nieuwe Maas. Het verschil in debiet is dan een uitstroom van de Rotte van 24,6m³/s (het totale maximum debiet van alle gemalen die afwateren op de Rotte). Uitgaande van een oppervlakte van de Rotte van 1,8 miljoen m² komt dit neer op een waterstandsaling van 5cm per uur.

Als maalstops worden opgestart na een kadedoorbraak, wordt als uitgangspunt gehanteerd dat deze in werking zijn na ongeveer 1 uur. Op dat moment is al ongeveer 700.000m³ water door de bres de achterliggende polder in gestroomd (zie Figuur 18). In het uur daarna, waarin de waterstand met 5 cm daalt, stroomt nog eens 200.000m³ de polder in. De kleine waterstandsaling van 5cm zal hier weinig invloed op hebben. Pas na enkele uren, als de waterstand verder is gedaald, zal dit daadwerkelijk veel invloed hebben op de instroom. Stel dat na 2 uur (na de doorbraak) nauwelijks nog water de polder instroomt als gevolg van de maalstops, dan is al de helft van het water (t.o.v. situatie zonder maalstops) het gebied in gestroomd. Waarschijnlijk zal echter ook na 2 uur nog instroom van water plaatsvinden. Ook bij het inzetten van maalstops zal dus nog steeds het grootste deel van het totale watervolume (situatie zonder maalstops, 1.800.000m³) de achterliggende polder (gebied A) instromen. Het is daarom niet realistisch te veronderstellen dat de vermindering van de schade in gebied A significant (minimaal factor 2) is.

Daarnaast geldt dat de maalstops nadelige invloed hebben op de schade in gebied B en gebied C:

- In de naastgelegen polders (gebied B), die niet meer kunnen afwateren, ontstaat wateroverlast door water op straat en stijging van de grondwaterstand;
- Als gevolg van maalstops daalt de waterstand in de Rotte sterker en sneller, waardoor grotere kans is op schade aan keringen elders in het boezemsysteem (gebied C).

Op basis van bovenstaande kan worden geconcludeerd dat het meenemen van maalstops als systeemmaatregel in elk geval niet gaat zorgen voor een significante vermindering van de schade, en daarmee tot een andere normklasse.

We merken op dat indien vroegtijdig een aankomende doorbraak wordt ontdekt, en maalstops al kunnen worden ingezet voordat de kering daadwerkelijk doorbreekt, de schade verder beperkt kan worden. De waterstand in de Rotte is dan namelijk al gezakt voordat de dijk is doorgebroken, en voordat instroom is begonnen. Om te bepalen hoeveel invloed dit heeft op de instroom van water, en daarmee op de schade, zijn verdere gedetailleerde analyses nodig, waarbij ook de gevolgen voor gebieden B en C gemonetariseerd dienen te worden.

4.4 Compartimenteren boezem

Het compartimenteren van de boezem kan leiden tot een verkleining van de instroom van water naar de achterliggende polder, doordat de aanvoer van water stopt. Het gecompartmenteerde deel van de boezem, waarin zich de bres bevindt, zal leegstromen, en daarna stroomt geen water meer de polder in.

Voor de casus Boezemkade - stedelijk is het moeilijk de boezem te compartimenteren, door de relatief grote breedte van de Rotte. Volgens de beheerder is compartimenteren slechts mogelijk op één locatie in de Rotte. Voor deze pilot is daarom verondersteld dat de helft van de boezem gecompartmenteerd kan worden. Het is niet realistisch dat het compartimenteren van de boezem binnen 4 uur (na besluit tot compartimenteren) gereed is. Op basis van het cumulatief ingestroomd debiet, zie Figuur 18, kan worden opgemaakt dat binnen 4 uur al 1.200.000m³ water het achterliggend gebied is ingestroomd. Na compartimenteren (van de halve boezem) is verondersteld dat nog de helft van het overige volume (ten opzichte van de situatie zonder compartimenteren) kan instromen. Dit betekent dat er nog 300.000 m³ kan instromen, waardoor het totaal ingestroomde volume neerkomt op 1.500.000m³. Ook bij het compartimenteren van de boezem zal dus nog steeds het grootste deel van het totale watervolume (situatie zonder compartimentering, 1.800.000m³) de achterliggende polder (gebied A) instromen. Het is daarom niet realistisch te veronderstellen dat de vermindering van de schade in gebied A significant (minimaal factor 2) is.

In casus Boezemkade - stedelijk is de schade in gebied B (omliggende polders) niet relevant (zie hoofdstuk 3). De systeemmaatregel zorgt in elk geval niet voor hogere schade in gebied B, en heeft daarmee dus geen invloed op de schade in dit gebied.

De schade in gebied C (boezemstelsel en boezemland) zal echter significant toenemen door het compartimenteren van de boezem. Het boezempeil in het gecompartmenteerde deel zal namelijk sterker en sneller dalen, waardoor de kans op schade aan keringen elders in het compartiment groter wordt.

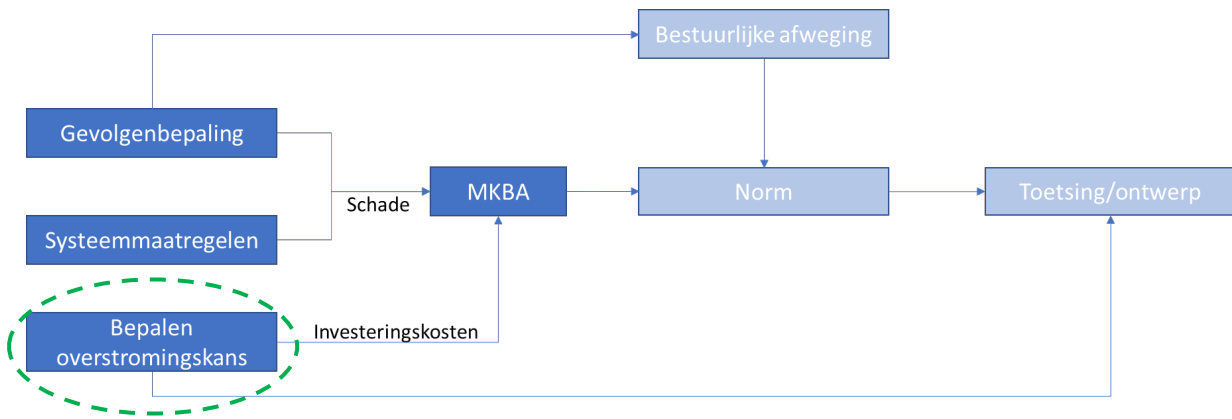
Op basis van bovenstaande kan worden geconcludeerd dat het meenemen van boezemcompartimentering als systeemmaatregel in elk geval niet gaat zorgen voor een significante vermindering van de schade, en daarmee tot een andere normklasse.

We merken op dat bovenstaande het geval is wanneer het besluit tot compartimentering wordt genomen na de doorbraak van de kering. Indien preventief compartimenteren zou worden toegepast, bij een dreigende doorbraak, is de veronderstelling dat dit leidt tot een vermindering van de instroom van 50% (omdat de halve boezem wordt gecompartmenteerd). Kanttekening hierbij is wel dat ook met de extra schade in gebied C rekening gehouden moet worden, en dat de totale kosten van de maatregel bij preventief compartimenteren hoger zijn, omdat deze vaker wordt ingezet (ook wanneer een doorbraak dreigt, maar uiteindelijk niet optreedt).

5 Bepalen overstromingskans

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft op welke wijze tot een overstromingskans van dijktraject Ommoord is gekomen. Eerst wordt een aanpak beschreven, daarna worden de verschillende stappen uit deze aanpak uitgewerkt, om uiteindelijk op een overstromingskans uit te komen. Figuur 19 toont de rol van het bepalen van de overstromingskans binnen de veiligheidsbenadering. De bepaling van de overstromingskans speelt een rol binnen de MKBA, omdat dit informatie geeft over de omvang van maatregelen die nodig zijn om de kering te versterken tot aan een bepaalde norm (overstromingskans), en daarmee over de bijbehorende investeringskosten. Uiteraard kunnen de methodes voor het bepalen van de overstromingskans die in dit hoofdstuk worden uitgewerkt, ook worden gebruikt in een toekomstige toetsing/beoordeling of ontwerp.



Figuur 19 Rol van bepaling overstromingskans in de veiligheidsbenadering.

5.2 Aanpak

Binnen deze pilot hanteren wij een stapsgewijze aanpak voor het bepalen van de overstromingskans in dijktraject Ommoord. Deze aanpak betreft geen vastgesteld stappenplan, maar dient puur ter illustratie van de verschillende mogelijkheden die er zijn om de faalkans te bepalen, van grof naar fijn. Het is slechts een voorbeeld van hoe een toekomstige beoordeling van de kering eruit zou kunnen zien.

Voor elke toekomstige casus dient opnieuw te worden beschouwd welk detailniveau nodig is, en welke methodes daarbij passen. Hiervoor kan een selectie worden gemaakt uit de methodes die zijn beschreven in het methoderapport.

De gehanteerde aanpak bestaat uit de volgende stappen⁶:

1. Screening: in de screening is op basis van eerdere toetsresultaten en berekeningen geïnventariseerd welke faalmechanismen en welke dijkvakken relevant zijn.

⁶ We merken op dat deze aanpak voornamelijk gericht is op de faalmechanismen met betrekking tot hoogte en geotechniek (stabiliteit en piping), en in mindere mate op faalmechanismen met betrekking tot bekledingen. Deze laatste zijn voor dijktraject Ommoord namelijk niet relevant, zoals ook blijkt uit de screening in de volgende paragraaf.

Hiertoe is eerst per faalmechanisme beschouwd of het mechanisme relevant is (lees: de faalkansbijdrage van het mechanisme is niet verwaarloosbaar). Vervolgens is voor de relevante faalmechanismen beschouwd:

- Of er dijkvakken zijn met een verwaarloosbare faalkansbijdrage voor het betreffende faalmechanisme;
- Of verschillende dijkvakken vergelijkbaar zijn met elkaar, en daarmee als één kunnen worden gezien (en dus kunnen worden beoordeeld op basis van één berekening die representatief is voor al deze vakken);
- Welke vakken het meest relevant zijn (lees: de hoogste faalkansbijdrage hebben). Op basis daarvan kan een ranking worden opgesteld (van hoogste faalkansbijdrage naar laagste faalkansbijdrage).

Deze screening is aan het eind van de beoordeling gebruikt om een inschatting te maken van de overstromingskans op trajectniveau.

2. Faalkans hoogte: voor de beoordeling op hoogte is geen grof-naar-fijn aanpak toegepast. De faalkans voor hoogte (falen door overslag/overloop) is namelijk relatief eenvoudig en snel te bepalen aan de hand van (probabilistische) berekeningen. Er zijn daarom geen alternatieve methodes nodig.
3. Faalkans macrostabiliteit: uit de screening blijkt dat macrostabiliteit naast hoogte het enige relevante faalmechanisme is. In deze pilot is de faalkans voor macrostabiliteit voor de maatgevende doorsnedes (volgend uit de screening) bepaald aan de hand van probabilistische berekeningen met fragility curves. Hierbij is van grof-naar-fijn gewerkt, aan de hand van steeds geavanceerdere berekeningen.

We merken op dat het zinvol kan zijn om vóór het maken van probabilistische berekeningen eerst een eenvoudigere methode toe te passen (grof-naar-fijn). Voor traject Ommoord lijkt de methode 'basis fragility curves en likelihood ratios' goed toepasbaar. In deze pilot is deze methode echter niet uitgewerkt, voor meer informatie verwijzen we naar het **methoderapport**.

We merken op dat we met de hierboven beschreven methodes steeds een faalkans op doorsnedeniveau bepalen voor een faalmechanisme. Deze worden vervolgens gecombineerd tot een totale faalkans (overstromingskans) voor het dijktraject, rekening houdend met o.a. het lengte-effect.

5.3 Screening

Voor de screening van dijktraject Ommoord is gebruik gemaakt van het toetsrapport uit 2012 [Witteveen+Bos, 2012], dat de detailtoets van de boezemkaden Rotte-Oost beschrijft conform de destijds vigerende leidraden. Deze detailtoets borduurt voort op een eerdere toetsing, waarin alle kades/doorsnedes op relatief eenvoudige wijze zijn getoetst. Deze toetsing is de RRD-toetsing genoemd. In de detailtoets van 2012 zijn alleen de doorsnedes beschouwd die op basis van de RRD-toetsing zijn afgekeurd. In 2020 heeft een kadeverbetering plaatsgevonden aan dijktraject Ommoord, waarbij de kades zijn versterkt voor binnenwaartse stabiliteit. Ook de ontwerprapportage van deze kadeverbetering [RPS, 2020] is gebruikt voor de screening.

Als eerste stap van de screening is voor alle faalmechanismen beschouwd of deze wel of niet relevant zijn voor dijktraject Ommoord. Deze beschouwing is weergegeven in Tabel 4.

Faalmechanisme	Relevant ja/nee
<i>Directe mechanismen:</i>	
Hoogte	<p>De beheerder van de kering geeft aan dat er sprake is van flinke zetting in het gebied; de kade zakt met 0,5 tot 2cm per jaar. De actuele kruinhoogte wordt (elke paar jaar) gemonitord op basis van laseraltimetrie. Op basis van deze monitoring wordt de meerjaren-onderhoudsplanning aangepast om de kades op te hogen tot aan de vereiste kadehoogte zoals vastgelegd in de legger.</p> <p>Door de zettingen en het frequente ophogen van de kades, is een periodieke hoogtetoets weinig zinvol. Hoogte is dan ook niet beschouwd in de meest recente toetsingen van de kades. Immers, het waterschap draagt in haar eigen onderhoud zorg voor het op vereiste hoogte houden van de kades, waarmee de kades voldoen aan de eisen voor hoogte.</p> <p>Binnen deze pilot is het doel een overstromingskans voor het dijktraject te bepalen. Het feit dat de kades voldoen aan de vereiste hoogte, is dan niet voldoende. De bijbehorende faalkans op hoogte is immers nog steeds onbekend. In deze pilot is daarom wel een beoordeling op hoogte uitgevoerd, waarin een faalkans voor hoogte (overslag/overloop) is bepaald.</p>
Macrostabieleit binnenwaarts	<p>In de toetsing van 2012 zijn verschillende kadevakken afgekeurd op binnenwaartse macrostabieleit. In 2020 is weliswaar een kadeverbetering uitgevoerd, maar we schatten in dat binnenwaartse stabieleit nog steeds relevant is voor de overstromingskans.</p>
Macrostabieleit buitenwaarts	<p>Buitenwaartse macrostabieleit is in de toetsing van 2012 niet beschouwd. In deze pilot hebben we dit mechanisme voor dijktraject Ommoord als niet relevant beschouwd, met de volgende redenen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Een buitenwaartse afschuiving wordt veroorzaakt door een val van de waterstand. Dijktraject Ommoord ligt echter langs een boezemstelsel, waar sprake is van een gereguleerde waterstand en een mogelijke val van de waterstand daarom slechts beperkt is (verschil tussen gehanteerd toetspeil in 2012 en streefpeil bedraagt slechts 0,3m). Aangezien in de huidige dagelijkse situatie geen sprake is van buitenwaartse instabieleit, en de situatie bij een beperkte val van de waterstand niet significant verslechtert, schatten we in dat de kans op een buitenwaartse afschuiving bij een val van de waterstand klein is. Bovendien is sprake van een lagere boezemwaterstand dan in het geval van falen bij hoogwater, waardoor ook de gevolgschade kleiner is. Op basis hiervan is verondersteld dat de overstromingskans (en het overstromingsrisico) door buitenwaartse afschuiving bij een val van de waterstand verwaarloosbaar is. - Een andere situatie die mogelijk zou kunnen leiden tot een buitenwaartse afschuiving is een doorbraak elders in het dijktraject, waardoor de waterstand daalt. Ook in dat geval is de gevolgschade (in de achterliggende polder) klein, door de lage boezemwaterstand, waardoor ook deze situatie als niet relevant is beschouwd. - Ten slotte kan een buitenwaartse afschuiving worden veroorzaakt door menselijke activiteiten, zoals verdieping van de boezembodem door baggeren en een bewuste verlaging van de waterstand. Falen door deze gebeurtenissen kan echter worden voorkomen met door voldoende adequaat beheer en onderhoud [STOWA, 2015], waardoor ook deze situaties als niet relevant zijn beschouwd.

	Op basis van bovenstaande is ingeschat dat de faalkans voor buitenwaartse macrostabiliteit verwaarloosbaar is. Buitenwaartse stabiliteit is daarom niet verder beschouwd. Indien wel nodig, zou de buitenwaartse stabiliteit kunnen worden beoordeeld op vergelijkbare wijze als binnenwaartse stabiliteit.
Piping	In de toetsing van 2012 is aangetoond dat er geen pipingrisico is, omdat hydraulische kortsluiting niet kan optreden. Daarmee kan een intredepunt voor piping worden uitgesloten. De faalkans voor piping is dus verwaarloosbaar, en piping is niet relevant.
Bekledingen	Bekledingen zijn niet beschouwd in de toetsing van 2012. Op basis van de schematisaties van destijds blijkt dat de kades in dijktraject Ommoord bestaan uit klei. Daarnaast betreft het boezemkades met kleine strijklengtes, waardoor slechts beperkte golfhoogtes voorkomen. Door de combinatie van kleidijken, die relatief goed bestand zijn tegen erosie, en lage golfhoogtes is de kans op een overstroming als gevolg van falen van de bekleding als verwaarloosbaar ingeschat. Bekledingen zijn daarmee niet relevant.
Kunstwerken	In het dijktraject Ommoord bevinden zich geen kunstwerken. Kunstwerken zijn daarmee niet relevant.
<i>Indirecte mechanismen:</i>	
Voorlanden	Voor de kades in dijktraject Ommoord is geen voorland aanwezig. Voorlanden zijn daarmee niet relevant.
NWO's	NWO's zijn in deze pilot niet beschouwd, omdat de verwachting is dat er geen NWO's in dijktraject Ommoord aanwezig zijn die de faalkans van het traject significant beïnvloeden.

Tabel 4 Relevantie faalmechanismen voor dijktraject Ommoord.

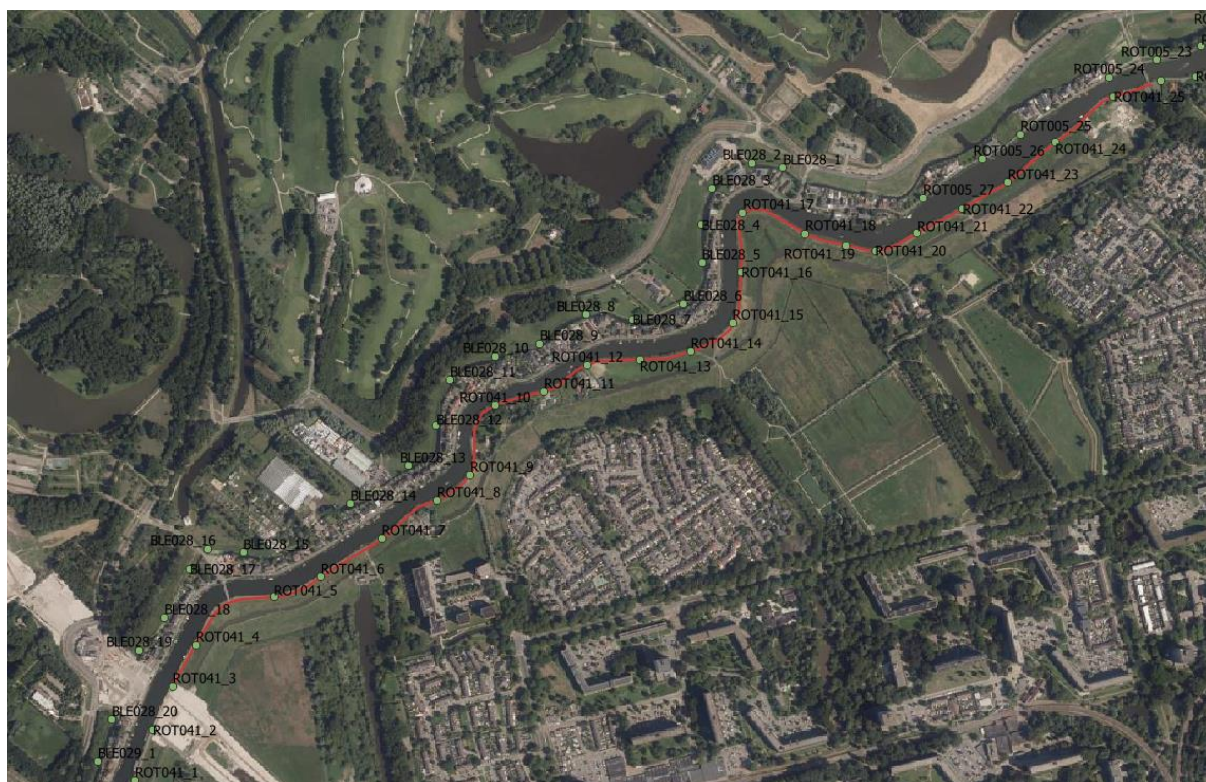
Op basis van bovenstaande tabel zijn hoogte en binnenwaartse macrostabiliteit de enige relevante faalmechanismen. De beoordeling hoogte is opgenomen in de volgende paragraaf. Hieronder is voor macrostabiliteit binnenwaarts nog een screening uitgevoerd naar relevante vakken/doorsnedes.

Macrostabiliteit binnenwaarts

Zoals eerder vermeld zijn in het toetsrapport van 2012 [Witteveen+Bos, 2012] alleen de doorsnedes getoetst die in de eerdere RRD-toetsing waren afgekeurd op binnenwaartse stabiliteit. Voor deze doorsnedes is in het toetsrapport een vakindeling/clustering opgesteld; de doorsnedes binnen één vak kunnen als vergelijkbaar worden beschouwd. Daarnaast is in het toetsrapport per vak één doorsnede als maatgevend gekozen. De vakindeling en de maatgevende doorsnedes zijn weergegeven in Tabel 5. De ligging van de doorsnedes is weergegeven in Figuur 20.

Vak	Doorsnedes	Maatgevende doorsnede	Reden splitsing vak
1	ROT41_1	ROT41_1	-
2	ROT41_5, ROT41_6	ROT41_6	ander peilvak
3	ROT41_7, ROT41_9	ROT41_9	goedgekeurd tussentraject
4	ROT41_11, ROT41_14 t/m ROT41_16	ROT41_14	andere bodemopbouw
5	ROT41_18, ROT41_19	ROT41_19	goedgekeurd tussentraject
6	ROT41_20 t/m ROT41_23	ROT41_23	andere geometrie
7	ROT41_24 t/m ROT41_26	ROT41_24	ander peilvak

Tabel 5 Vakindeling macrostabiliteit.



Figuur 20: Ligging doorsnedes RRD.

De doorsnedes die al waren goedgekeurd in de eerdere RRD-toetsing zijn niet opgenomen in bovenstaande tabel. Voor deze doorsnedes kan worden gesteld dat ze niet bepalend zijn voor de overstromingskans, omdat de doorsnedes in bovenstaande tabel slechter scores voor binnenwaartse stabiliteit.

In de toetsing van 2012 [Witteveen+Bos, 2012] zijn de maatgevende doorsnedes opnieuw beoordeeld, aan de hand van aangescherpte uitgangspunten. De resulterende stabiliteitsfactoren zijn opgenomen in Tabel 6. Hieruit blijkt duidelijk dat doorsnede ROT41_24 maatgevend is voor dijktraject Ommoord.

Vak	Maatgevende doorsnede	Stabiliteitsfactor
1	ROT41_1	0,98
2	ROT41_6	1,22
3	ROT41_9	0,92
4	ROT41_14	0,92
5	ROT41_19	0,95
6	ROT41_23	0,97
7	ROT41_24	0,81

Tabel 6 Resultaten toetsing 2012.

In 2020 zijn de kades van dijktraject Ommoord verbeterd. In de ontwerprapportage [RPS, 2020] zijn verkennende berekeningen gemaakt, voor doorsnedes ROT41_9, ROT41_14, ROT41_19 en ROT41_24. In deze berekeningen is het dwarsprofiel zodanig aangepast dat dit voldoet aan de legger [HHSK, 2012] en vervolgens de stabiliteitsfactor bepaald. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 7.

Doorsnede	Stabiliteitsfactor
ROT41_9	1,22
ROT41_14	1,21
ROT41_19	1,22
ROT41_24	1,17

Tabel 7 Resultaten ontwerpberekeningen.

Op basis van de berekende stabiliteitsfactoren voldoet het ontwerp aan de huidige norm. De vereiste stabiliteitsfactor bedraagt 1,10 [RPS, 2020]. Doorsnede ROT41_24 is nog steeds maatgevend. Beheerder HHSK heeft vervolgens de kades verbeterd door over het gehele talud een laag klei aan te brengen. Dit is meer dan in de ontwerpberekeningen is gehanteerd, en het resulterende profiel is ruimer dan het leggerprofiel. Het ondertalud is aangevuld tot een niveau van -2,50m+NAP op 15m uit de kant van de verharding. De klei is aangebracht onder een helling van 1:8. Het aangelegde dijkprofiel is weergegeven in Figuur 21.



Figuur 21 Aangelegd dijkprofiel bij dijkversterking.

Figuur 22 toont een bovenaanzicht van het dijktraject tijdens/na de kadeverbetering. Hierin is aan de beige kleur goed te zien dat vrijwel het hele traject is verbeterd. Op een klein deel van het traject, nabij woningen, is vanwege ruimtegebrek geen verbetering uitgevoerd. Dit deel is rood omcirkeld in de figuur.



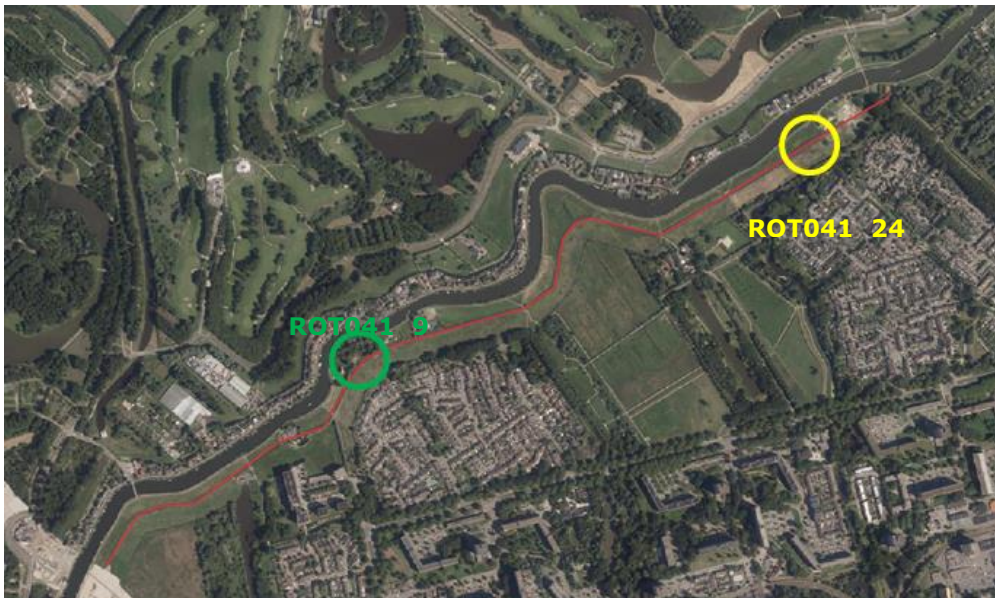
Figuur 22 Bovenaanzicht kadeverbetering.

In Figuur 23 is links ingezoomd op het gebied in de rode cirkel uit Figuur 22. Rechts toont de hoogtes in het gebied, afkomstig uit AHN4. In de bocht (rond dijkpaal 11.8) is de kade (lichtgrijs) relatief breed, waardoor de kade op zichzelf al relatief veilig is, ook zonder kadeverbetering. Ter plaatse van de rode lijn is echter een doorsnede te vinden waar de kade relatief smal is (zie AHN rechts), en waar ook geen kadeverbetering is uitgevoerd (zie links). Deze doorsnede is potentieel risicovol, en daarmee ook relevant voor dijktraject Ommoord. We noemen deze doorsnede in het vervolg ROT041_9, naar de meest nabijgelegen doorsnede uit de toetsing van 2012. We merken op dat deze potentieel maatgevende doorsnede (met steil talud) slechts over een aantal meters langs het dijktraject voorkomt. Dit komt later nog aan bod in de reflectie op dit hoofdstuk.



Figuur 23 Overzicht nabij woningen

Concluderend kunnen we stellen dat de meest relevante doorsnedes voor binnenwaartse macrostabiliteit ROT041_9 en ROT041_24 zijn. Figuur 24 toont de ligging van deze locaties in het dijktraject.



Figuur 24 Relevante doorsnedes binnenwaartse stabiliteit.

5.4 Faalkans hoogte

5.4.1 Inleiding

De tweede stap uit het plan van aanpak is het bepalen van de faalkans op hoogte van dijktraject Ommoord. We merken op dat de hoogte niet relevant was in eerdere toetsingen van het dijktraject, omdat de kering regelmatig wordt opgehoogd. In deze pilot zijn echter toch berekeningen gemaakt, om de faalkans voor hoogte expliciet te bepalen. De faalkans voor hoogte (falen door overslag/overloop) is berekend aan de hand van PROMOTOR [Kuijper, 2021] berekeningen.

5.4.2 Aanpak

Voor de faalkansberekeningen met PROMOTOR zijn langs het beschouwde traject randvoorwaardenpunten gelegd om de ca. 100 meter. Deze zijn weergegeven in Figuur 25 (oranje punten Loc01 t/m Loc025).

Voor elk van de randvoorwaardenpunten is een faalkansberekening gemaakt met PROMOTOR op basis van de volgende invoergegevens:

- Het gehanteerde streefpeil bedraagt $-1,02\text{m}+\text{NAP}$.
- De boezemwaterstandstatistiek bestaat uit waterstanden bij terugkeertijden van 1, 3, 10, 30, 100, 300 en 1000 jaar, zoals afgeleid in de WSA Schielandse boezem [HKV, 2020]. De uitvoerpunten waarop deze statistiek beschikbaar is, zijn in Figuur 25 weergegeven (paarse punten in de as). Voor elk randvoorwaardenpunt is de statistiek gehanteerd van het dichtstbijzijnde uitvoerpunt. De statistiek varieert niet veel over het beschouwde traject. De eens per 1000 jaar waterstand ligt bij alle randvoorwaardenpunten op ca. $\text{NAP} -0,85\text{ m}$.
- De scheefstand (langsopwaaiing) is voor alle randvoorwaardenpunten en windcondities op nul gezet, aangezien dit windeffect reeds is meegenomen bij de bepaling van de boezemwaterstandstatistiek in de WSA Schielandse boezem.
- Voor de windstatistiek is uitgegaan van de standaard windstatistiek binnen PROMOTOR. Binnen PROMOTOR bestaat de optie om te rekenen met gereduceerde windsnelheden, afhankelijk van de ruwheid van het landschap. Voor deze faalkansberekeningen is ruwheidsklasse 4 ("ruwweg open landschap") gehanteerd, hetgeen overeenkomt met een ruwheidslengte van 0,1 m en effectief neerkomt op een reductiefactor van 0,94 (m.a.w. 6% lagere windsnelheid).
- Voor de bodemhoogte is uitgegaan van de waterdiepte van 2 meter op basis van de leggergegevens [HHSK, 2012]. Verondersteld is dat dit geldt bij streefpeil. De gemiddelde bodemhoogte is daarom voor alle randvoorwaardenpunten en windrichtingen gelijk genomen aan $-3,02\text{m}+\text{NAP}$.
- De effectieve strijklengtes zijn afgeleid met PROMOTOR met behulp van het vlakkenbestand voor de boezem van de Rotte, zoals weergegeven in Figuur 25 (gearceerde vlak). Ter illustratie: de maximaal berekende effectieve strijklengte bedraagt 143 meter (Loc19, windrichting NO).
- Voor de golfparameters is uitgegaan van de golfgroeimodule van Bretschneider.
- Uit de toegeleverde leggergegevens [REF] blijkt dat alle randvoorwaardenpunten uit Figuur 25 liggen langs kadevak ROT_041 (B.L. Rottekade III). Aangezien HHSK in haar eigen onderhoud zorg draagt voor het op vereiste hoogte houden van de kering (conform legger), is de

dijktafelhoogte uit de legger gehanteerd als kruinhoogte. De dijktafelhoogte bedraagt conform de legger $-0,5\text{m}+\text{NAP}$ en het buitentalud heeft een helling van 1:2.

- De dijknormalen zijn (net als de strijklengtes) afgeleid met PROMOTOR met behulp van het vlakkenbestand voor de boezem van de Rotte, zoals weergegeven in Figuur 25 (gearceerde vlak). Deze variëren van ca. 265° tot 20° t.o.v. Noord.
- Voor de ruwheid van het buitentalud is uitgegaan van een grasbekleding.
- Voor het kritiek golfoverslagdebiet is uitgegaan van twee verschillende waarden, namelijk 1 en 10 l/s/m .



Figuur 25 Ligging randvoorwaardenpunten langs het beschouwde traject (oranje punten: Loc01 t/m Loc25).

5.4.3 Resultaat

Tabel 8 geeft de berekende faalkansen voor het faalmechanisme golfoverslag, uitgaande van de kruinhoogte van $-0,5\text{m}+\text{NAP}$ en een kritiek golfoverslagdebiet van 1 of 10 l/s/m .

Locatie	Faalkans 1 l/s/m [1/jaar]	Faalkans 10 l/s/m [1/jaar]
1	1/266.000	< 1/1.000.000
2	1/246.000	< 1/1.000.000
3	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
4	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
5	1/172.000	< 1/1.000.000
6	1/65.300	< 1/1.000.000
7	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
8	1/13.100	< 1/1.000.000
9	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
10	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
11	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
12	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
13	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
14	1/39.600	< 1/1.000.000
15	1/391.000	< 1/1.000.000
16	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
17	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
18	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
19	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
20	1/6.100	< 1/1.000.000
21	1/71.900	< 1/1.000.000
22	1/22.400	< 1/1.000.000
23	1/22.900	< 1/1.000.000
24	1/8.340	< 1/1.000.000
25	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
Maximaal	1/6.100	< 1/1.000.000

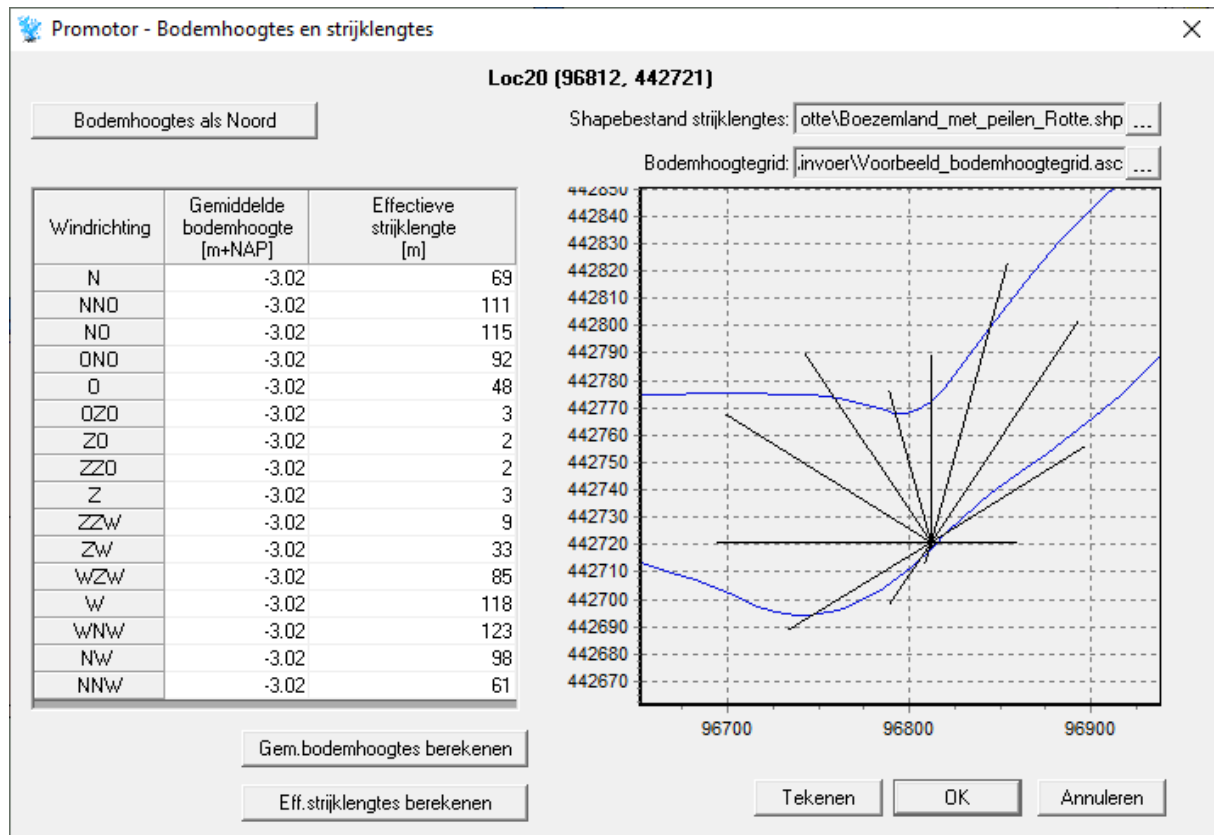
Tabel 8 Faalkansen zoals berekend met PROMOTOR.

Zoals te zien in Tabel 8, zijn bij een kritiek golfverslagdebiet van 10 l/s/m alle faalkansen verwaarloosbaar klein.

Bij een kritiek golfverslagdebiet van 1 l/s/m is de maximale faalkans gelijk aan 1/6.100 per jaar. Deze faalkans wordt gevonden bij locatie 20 (zie Figuur 26). Om een beeld te geven van omstandigheden die tot falen leiden: het illustratiepunt voor deze berekening bestaat uit een waterstand vrijwel gelijk aan het streefpeil, windrichting 292,5° en windsnelheid 34,9 m/s. De significante golfhoogte is in dat geval gelijk aan 38 cm. Dit leidt bij het gehanteerde dwarsprofiel (met kruinhoogte NAP -0,5 m) tot een optredend golfverslagdebiet van 1 l/s/m.

Ten behoeve van deze pilot is verondersteld dat het kritiek overslagdebiet voor dijktraject Ommoord 1 l/s/m bedraagt. Bij dit debiet berekenen we namelijk faalkansen die niet verwaarloosbaar zijn. Aan de hand daarvan kunnen we in paragraaf 5.7 laten zien hoe faalkansen per faalmechanisme en per doorsnede vertaald kunnen worden naar een totale faalkans op trajectniveau. In toekomstige beoordelingen dient telkens een afweging gemaakt te worden welk kritiek overslagdebiet past bij de berekende doorsnede, afhankelijk van de graskwaliteit.

Bij een overslagdebiet van 1 l/s/m zijn de maatgevende locaties: locatie 8 met faalkans 1/13.100, locatie 20 met 1/6.100 en locatie 24 met faalkans 1/8.340.



Figuur 26 Screenshot PROMOTOR: bodemhoogtes en strijklengtes maatgevende locatie.

5.5 Faalkans binnenwaartse macrostabiliteit

5.5.1 Inleiding

Zoals beschreven in het plan van aanpak is de faalkans voor binnenwaartse macrostabiliteit bepaald aan de hand van probabilistische berekeningen (al dan niet met bewezen sterkte). De faalkans is bepaald voor de twee meest relevante vakken van dijktraject Ommoord. Op basis van de screening zijn dit ROT041_24 en ROT041_9.

5.5.2 Aanpak

De probabilistische berekeningen zijn gemaakt aan de hand van fragility curves. Dit houdt in dat voor verschillende belastingen (met verschillende terugkeertijden) een conditionele faalkans wordt bepaald. De fragility curve toont de relatie tussen (de terugkeertijd van) de belasting en de conditionele faalkans. Door deze conditionele faalkansen te vermenigvuldigen met de terugkeertijden van de belasting, en het geheel te integreren, kan de faalkans per jaar voor de doorsnede worden bepaald.

De freatische lijn en de verkeerslast zijn beschouwd als de belangrijkste belastingen voor binnenwaartse stabiliteit.⁷

De conditionele faalkansen zijn berekend met behulp van probabilistische berekeningen in D-Stability (2021.02). Hierbij zijn per belastingstap de belastingen deterministisch ingevoerd, en de sterkteparameters als stochast (met kansverdeling).

In de pilot hebben we een stapsgewijze aanpak gehanteerd voor de probabilistische berekeningen:

1. In eerste instantie is alleen de freatische lijn als variabele belasting gehanteerd. De freatische lijn is geschematiseerd voor drie verschillende situaties (belastingstappen), elk met een eigen terugkeertijd. De verkeerslast is hierbij als determinist geschematiseerd; dit impliceert dat de geschematiseerde verkeerslast permanent op de kade aanwezig is.
2. In werkelijkheid is geen sprake van een vaste verkeerslast die permanent op de kade aanwezig is; net als de freatische lijn is de verkeerslast ook variabel. In de tweede stap zijn ook drie situaties voor de verkeerslast, elk met eigen terugkeertijd, toegevoegd. Hierdoor ontstaan in totaal 9 belastingstappen (3 situaties freatische lijn x 3 situaties verkeerslast).
3. In de derde stap is, indien nodig, bewezen sterkte toegepast.

Naar deze stappen wordt in het vervolg van het rapport verwezen als stap 1, stap 2 en stap 3.

5.5.3 Uitgangspunten

Schematisaties

De schematisaties (geometrie en grondopbouw) zijn als volgt opgesteld:

- Voor ROT041_24 is de berekening uit het ontwerprapport [RPS, 2020] als basis gebruikt. De geometrie is aangepast naar de uiteindelijk toegepaste verbetering, zoals weergegeven in Figuur 21.
- Ook voor ROT041_09 is de berekening uit het ontwerprapport als basis gebruikt. De geometrie is aangepast op basis van AHN4.

Sterkteparameters

In de berekeningen uit het ontwerprapport, die als basis zijn gebruikt, is de sterkte van de ondergrond geschematiseerd aan de hand van sigma-tau curves. De berekeningen zijn destijds gemaakt met de inmiddels verouderde D-GeoStability software.

De berekeningen in deze pilot zijn gemaakt met de nieuwe D-Stability (2021.02) software. Hierin is het niet mogelijk de sterkte te schematiseren met sigma-tau curves. In plaats daarvan is het MohrCoulomb sterktemodel toegepast. Op basis van een raaklijn aan de sigma-tau curve zijn per grondlaag de parameters c' (snijpunt raaklijn met y-as) en φ (hellingshoek van de raaklijn) afgeleid. De dilatantie is vervolgens gelijkgesteld aan φ .

De afgeleide parameters zijn karakteristieke parameters (5%-ondergrens). De stochastische verdelingen zijn als volgt bepaald: conform Tabel 2b uit de Eurocode [NEN997-1+C2, 2017] is voor de variatiecoëfficiënt van de cohesie (c') 20% gehanteerd, en voor de wrijvingshoek (φ) 10%. De

⁷ Dit is in tegenstelling tot de huidige vigerende praktijk voor regionale keringen, waar de buitenwaterstand als belangrijkste belasting wordt beschouwd. Omdat traject Ommoord echter een boezemkering is, met beperkte variatie in waterstand, is ingeschat de ligging van de freatische lijn en de verkeerslast belangrijker zijn voor binnenwaartse stabiliteit.

verwachtingswaarden zijn vervolgens zodanig gekozen, dat de 5%-ondergrens van de stochastische verdelingen (verwachtingswaarde en variatiecoëfficiënt) gelijk is aan de afgeleide karakteristieke waarden.

Tabel 9 toont de invoerwaarden van de parameters c' en ϕ . Voor de dilatantie is dezelfde stochastische verdeling ingevoerd als voor ϕ . Daarnaast zijn beide parameters als volledig gecorreleerd beschouwd, zodat beide parameters altijd dezelfde waarde hebben.

Grondsoort	c'_{kar}	c'_{verw}	c'_{var}	ϕ_{kar}	ϕ_{verw}	ϕ_{var}
Antropogeen, klei	0	-	-	20,83	24,67	10%
Veen	1,49	2,10	20%	21,94	25,98	10%
Klei humeus	1,91	2,70	20%	16,67	19,85	10%
Klei siltig	2,20	3,10	20%	19,03	22,53	10%

Tabel 9 Sterkteparameters.

Belastingstappen

Bij het combineren van verschillende belastingen (freatische lijn en verkeerslast, stap 2 van de stapsgewijze aanpak) dienen we rekening te houden met gelijktijdigheid. Als we in een belastingstap twee belastingen met elkaar combineren, schematiseren we immers het tegelijk voorkomen van beide belastingen. Hierbij dient rekening te worden gehouden met de tijdsperiode waarin een bepaalde belasting voorkomt. Hiertoe hanteren we gelijke tijdseenheden voor beide belastingen bij het inschatten van de kans op voorkomen (overschrijdingskans belasting), namelijk de kleinste tijdseenheid die wordt gehanteerd bij een van de belastingen. Bij de verkeerslast wordt de kleinste tijdseenheid gebruikt, namelijk een dagelijkse overschrijdingskans. Daarom is zowel voor de situaties voor freatische lijn, als die voor verkeerslast, de overschrijdingskans per dag beschouwd.

Freatische lijn

Voor de freatische lijn zijn de uitgangspunten uit de ontwerpberoeeningen als basis gebruikt. Uiteindelijk zijn voor de probabilistische berekeningen drie situaties voor de freatische lijn opgesteld, elk met een bepaalde kans van optreden (overschrijdingskans):

- De freatische lijn uit de ontwerpberoeening, met een buitenwaterstand van $-0,72\text{m}+\text{NAP}$. De ontwerpberoeening gaat uit van een overschrijdingskans van de belasting van 1/1000 jaar (IPO-V kade). Ingeschat is dat een dergelijke freatische lijn ongeveer 7 dagen aanhoudt. De dagelijkse overschrijdingskans is daarmee: $7/365 * 1/1000 = 7/365.000$.
- Een freatische lijn bij dagelijkse situatie. De buitenwaterstand is in dit scenario op streefpeil gelegd ($-1,0\text{m}+\text{NAP}$), en ligt daarmee $0,28\text{m}$ lager dan in de ontwerpberoeening. Ter plaatse van de binnenkruinlijn en buitenkruinlijn is de freatische lijn ook $0,28\text{m}$ lager gelegd dan in de ontwerpberoeening. Dit betreft een min of meer gemiddelde freatische lijn, met een dagelijkse overschrijdingskans van 50%, dus 1/2.
- Een verzadigde dijk, waarin de freatische lijn op kruinniveau ligt. Ingeschat is dat deze situatie een factor 10 lagere kans heeft dan de ontwerpberoeening. De dagelijkse overschrijdingskans is daarmee $7/3.650.000$.

We merken op dat bovenstaande situaties eenvoudige aannames zijn voor de ligging van de freatische lijn bij verschillende overschrijdingskansen, op basis van de beperkt beschikbare informatie. Voor het doel van deze pilot volstaan deze aannames. Het verdient aanbeveling om bij een toekomstige beoording/toetsing uitgebreider onderzoek te doen naar de ligging van de freatische lijn en de bijbehorende terugkeertijd. Hierbij is een logische volgorde om eerst het

drijvende mechanisme achter de ligging van de freatische lijn te bepalen (neerslag, buitenwaterstand, etc.) en vervolgens een koppeling te leggen tussen dit mechanisme en de freatische lijn (bijvoorbeeld koppeling tussen de hoeveelheid neerslag en de ligging van de freatische lijn op verschillende punten in het dijkprofiel). Vervolgens leidt de kansverdeling van het drijvende mechanisme (bijvoorbeeld kansverdeling van de neerslag) en de koppeling met de freatische lijn tot een kansverdeling van de freatische lijn.

Stijghoogte en waterspanningen

Voor de stijghoogte in het watervoerend pakket en het verloop van de waterspanningen zijn de uitgangspunten uit de ontwerpberekening overgenomen [RPS, 2020].

Verkeerslast

Als verkeerslast is in stap 1 een vaste waarde van 13kN/m^2 gebruikt, conform de uitgangspunten uit de ontwerpberekeningen [RPS, 2020]. Hierbij is een spreidingshoek van 45 graden gebruikt, en aanpassingspercentages van de cohesieve lagen van 30% (deklaag) en 50% (antropogeen materiaal), ook conform de ontwerpberekeningen.

In stap 2 zijn drie verschillende situaties voor de verkeerslast geschematiseerd, elk met een bepaalde kans van voorkomen (overschrijdingskans):

- Verkeerslast van 1kN/m^2 , die overeenkomt met een rij aaneengesloten personenauto's. Voor deze situatie is ingeschat dat deze ca. eens in de 2 dagen overschreden wordt, dus met een dagelijkse overschrijdingskans van $1/2$.
- Verkeerslast van 5kN/m^2 , een relatief zware verkeerslast die overeenkomt met zwaardere voertuigen ten behoeve van onderhoudswerkzaamheden. Voor deze situatie is ingeschat dat deze ca. tweemaal per jaar overschreden wordt. De dagelijkse overschrijdingskans is daarmee $2/365$.
- Verkeerslast van 13kN/m^2 , die overeenkomt met zeer zwaar verkeer, zoals twee grote zandauto's die aaneengesloten ('kop-staart') op de kade staan. Voor deze situatie is ingeschat dat deze zeer sporadisch voorkomt, en eens in de 10 jaar overschreden wordt. De dagelijkse overschrijdingskans is dan: $1/10 * 365 = 1/3.650$.

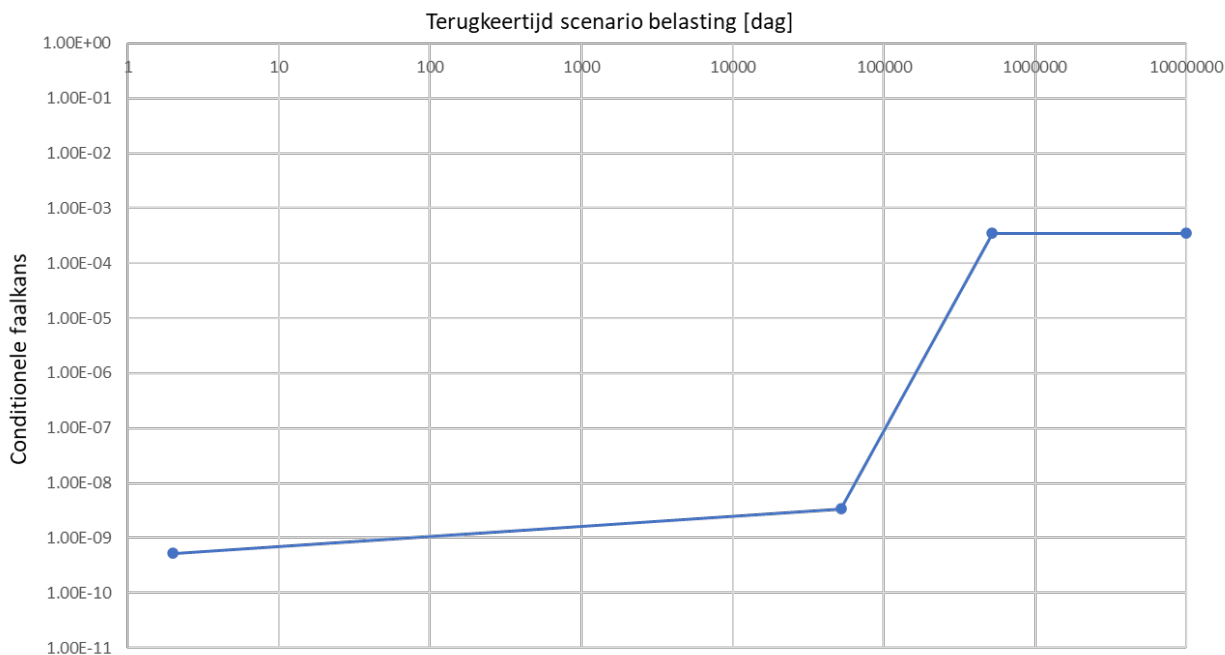
5.5.4 Stap 1: vaste verkeerslast

Doorsnede ROT041_24

Tabel 10 toont voor stap 1 per belastingstap de overschrijdingskans van de belasting, de betrouwbaarheidsindex β , en de conditionele faalkans. Zoals vermeld is in stap 1 enkel de freatische lijn als variabele belasting gehanteerd. Figuur 27 toont de resulterende fragility curve, die de relatie weergeeft tussen terugkeertijd van de belasting en de conditionele faalkans. Merk op dat we de conditionele faalkans bij dagelijkse kans op overschrijding van de freatische lijn van $7/3.650.000$ (verzadigde dijk) als maximum hebben gehanteerd; ook bij hogere belastingen (met kleinere overschrijdingskans) wordt de conditionele faalkans niet hoger. Immers, bij een overschrijdingskans van $7/3.650.000$ is al sprake van een verzadigde dijk, en bij nog hogere belastingen kan de dijk niet nog meer verzadigd raken, waardoor de stabiliteit (en dus de conditionele faalkans) gelijk blijft.

Situatie FL	Dagelijkse overschrijdingskans	β	Cond. Faalkans
Dagelijks	1/2	6,101	5,27E-10
Ontwerp 2020	7/365.000	5,796	3,40E-09
Verzadigd	7/3.650.000	3,390	3,49E-04

Tabel 10 Resultaten per belastingstap voor ROT041_24.



Figuur 27 Fragility curve ROT041_24. De x-as beschrijft de inverse van de overschrijdingskans van de belasting in een tijdsperiode van een dag.

De faalkans per dag is gelijk aan het oppervlak onder de fragility curve. Dit is geïllustreerd in Figuur 28. Deze oppervlakte (faalkans) is op grove wijze ingeschat door het geheel te verdelen in drie blokken (A, B en C), waarmee de faalkans gelijk is aan de totale oppervlakte van deze blokken:

- Blok A tussen belastingstap 'dagelijks' en 'ontwerp 2020', met kansen van 1/2 en 7/365.000. De hoogte (H) van blok A is gelijk aan de gemiddelde van de conditionele faalkansen bij deze belastingstappen (1,96E-09). De breedte (B) is gelijk aan het verschil tussen de kansen van optreden van deze belastingstappen. De oppervlakte van A is gelijk aan de hoogte maal de breedte (H x B).
- Blok B tussen belastingstap 'ontwerp 2020' en 'verzadigd', met kansen van 7/365.000 en 7/3.650.000. De oppervlakte is vervolgens op dezelfde wijze bepaald als voor blok A.
- Blok C van belastingstap 'verzadigd' (met kans van 7/3.650.000) tot oneindig. De hoogte (H) van blok C is gelijk aan de conditionele faalkans bij belastingstap 'verzadigd' (dit is de maximale faalkans). De breedte (B) is gelijk aan 7/3.650.000, omdat het blok doorloopt van een kans van optreden van 7/3.650.000 tot oneindig kleine kansen. De oppervlakte van blok C is weer gelijk aan hoogte maal breedte (H x B).

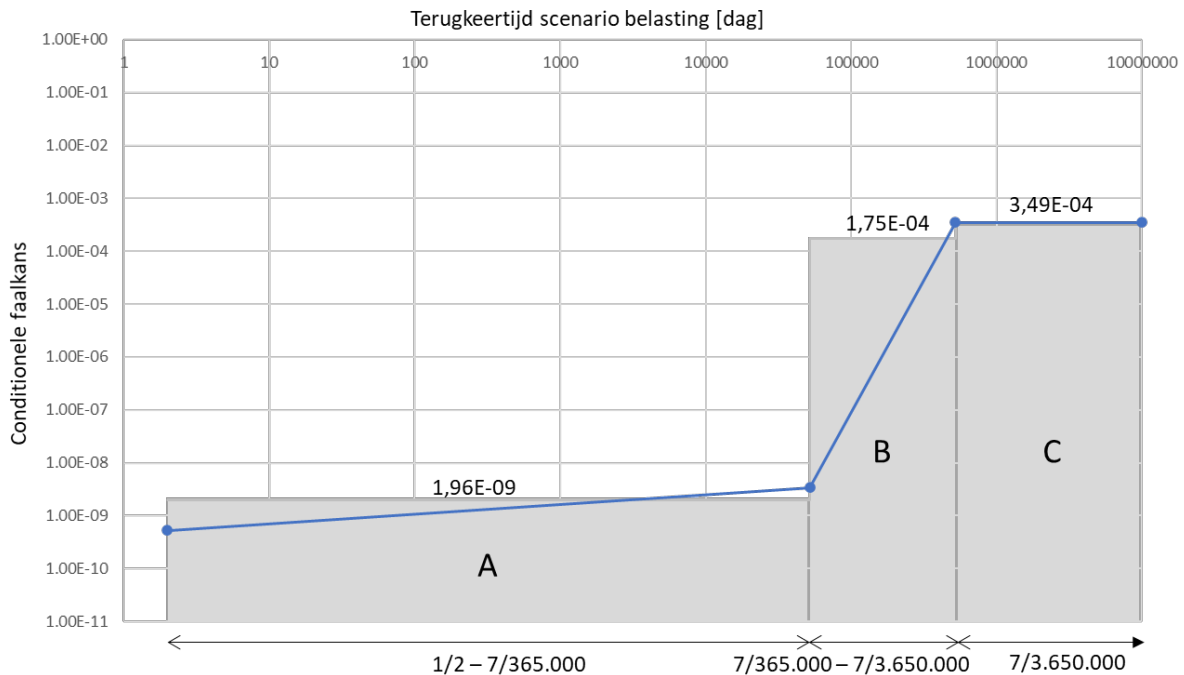
Dit levert een totale faalkans op voor doorsnede ROT041_24 van 4,93E-09. Omdat de overschrijdingskansen van de belastingen in dagelijkse kansen zijn uitgedrukt (en de bijbehorende

terugkeertijd in dagen), is dit een dagelijkse faalkans. De jaarlijkse faalkans kan (bij veilige benadering⁸) worden bepaald met de volgende formule:

$$Pf_{jaarlijks} = 1 - (1 - Pf_{dagelijks})^{365}$$

De jaarlijkse faalkans bedraagt hiermee 1,80E-06 (1/555.000).

We merken op dat deze manier van het bepalen van de totale faalkans grof is. Als de kansverdeling van de belasting in meer detail bekend is, kan ook het oppervlak onder de fragility curve, en daarmee de totale faalkans, in meer detail bepaald worden. Voor deze pilot volstaat echter de gehanteerde grove methode.



Figuur 28 Bepalen faalkans per jaar ROT041_24.

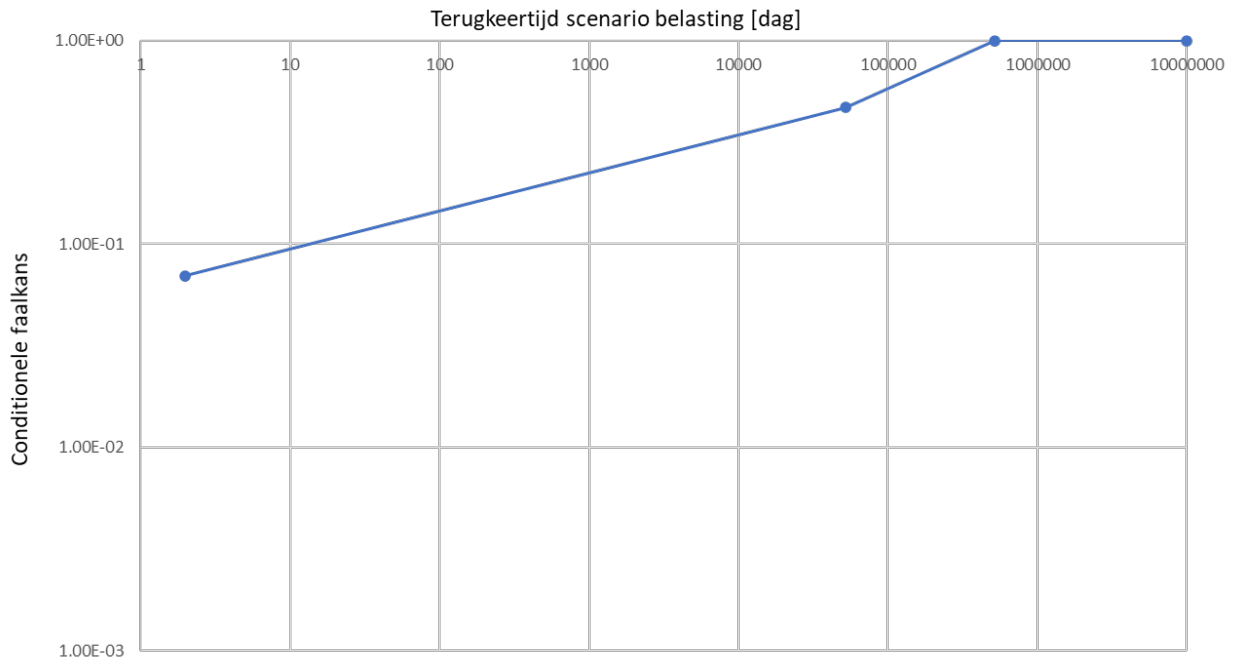
Doorsnede ROT041_9

De faalkans voor doorsnede ROT041_9 is bepaald op vergelijkbare wijze als ROT041_24. Tabel 11 toont de resultaten per belastingstap en Figuur 29 toont de fragility curve. De totale dagelijkse faalkans voor ROT041_9 bedraagt 1,70E-01. Dit komt neer op een jaarlijkse kans van 1. Deze faalkans is onrealistisch hoog; als de faalkans daadwerkelijk 1 zou zijn, had de kring al gefaald moeten zijn. Deze faalkans wordt aangescherpt in de volgende paragrafen (grof-naar-fijn). In een toekomstige beoordeling is het aan te bevelen om bij hoge berekende faalkansen de schematisatie nog eens kritisch te beschouwen, voordat wordt overgegaan naar complexere rekenmethodes. Ten behoeve van deze pilot is de schematisatie niet opnieuw beschouwd, maar is direct overgegaan naar complexere rekenmethodes.

⁸ We negeren hierbij de correlatie in het tijdsdomein die ontstaat doordat de onzekerheid t.a.v. de sterkte in de tijd gecorreleerd is. De werkelijke sterkte is weliswaar onbekend maar niet variabel in de tijd.

Situatie FL	Dagelijkse overschrijdingskans	β	Cond. Faalkans
Dagelijks	1/2	1,477	6,98E-02
Ontwerp 2020	7/365.000	0,074	2,19E-01
Verzadigd	7/3.650.000	-4,49	1

Tabel 11 Resultaten per belastingstap voor ROT041_9.



Figuur 29 Fragility curve ROT041_9. De x-as beschrijft de inverse van de overschrijdingskans van de belasting in een tijdsperiode van een dag.

5.5.5 Stap 2: Variabele verkeerslast

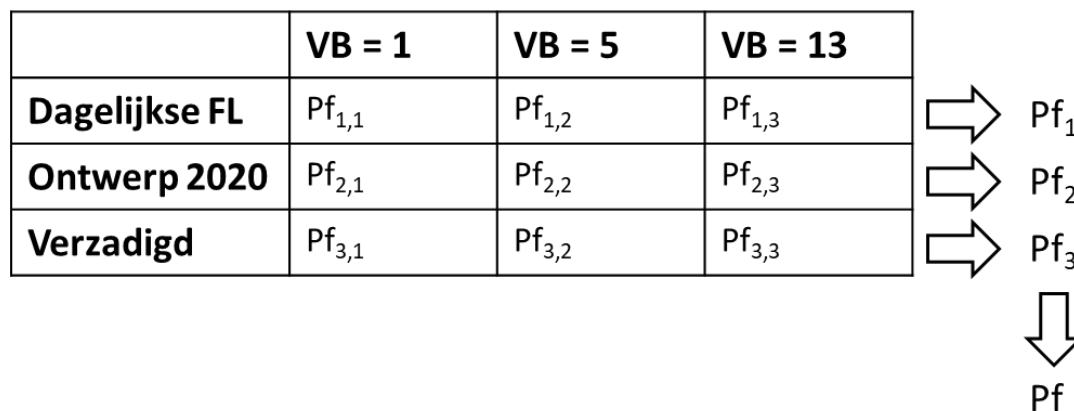
Belastingstappen

In stap 2 is behalve de freatische lijn ook de verkeerslast als variabele belasting geschematiseerd. In totaal zijn 9 belastingstappen (scenario's) geschematiseerd, elk met een eigen kans van optreden. Deze bestaan uit combinaties van de 3 situaties voor de freatische lijn en de 3 situaties voor verkeerslast (zie paragraaf 5.5.3).

Het combineren van de verschillende belastingstappen/scenario's naar een totale faalkans gaat op vergelijkbare wijze als in stap 1. Alleen zijn er meer stappen benodigd, omdat we werken met twee variabele belastingen in plaats van een. Om de werkwijze te illustreren, verwijzen we naar Figuur 30. Deze toont een matrix met de verschillende belastingstappen, waarbij elke belastingstap bestaat uit een combinatie van een freatische lijn en een verkeerslast. Voor al deze belastingstappen is een conditionele faalkans berekend ($Pf_{x,y}$). Het combineren van deze conditionele kansen tot een totale faalkans gaat als volgt:

- Eerst is per situatie van de freatische lijn (per regel in de tabel van Figuur 30) de totale faalkans gegeven die freatische lijn bepaald. Hiertoe is (voor de 1e regel) een fragility curve gemaakt waarin de conditionele kansen $Pf_{1,1}$ t/m $Pf_{1,3}$ zijn uitgezet tegen de overschrijdingskans van de verkeerslast, waarna het oppervlak onder deze fragility curve is bepaald, leidend tot kans Pf_1 . Dit is herhaald voor de 2e en 3e regel uit de tabel.

- Vervolgens is een fragility curve gemaakt waarin de kansen Pf_1 , Pf_2 , Pf_3 zijn uitgezet tegen de overschrijdingskans van de freatische lijn. De totale faalkans is gelijk aan het oppervlak onder deze fragility curve.



Figuur 30 Combineren belastingstappen tot totale kans.

Doorsnede ROT041_24

Tabel 12 toont voor ROT041_24 de berekende conditionele faalkansen bij de verschillende belastingstappen. Combineren van al deze belastingstappen conform Figuur 30 leidt tot een totale dagelijkse faalkans van $7,28E-11$. De jaarlijkse kans bedraagt $2,66E-08$ ($=1/37.600.000$).

	VB = 1kN/m²	VB = 5kN/m²	VB = 13kN/m²
Dagelijkse FL	1,45E-14	5,48E-13	5,27E-10
Ontwerp 2020	1,62E-13	5,05E-12	3,40E-09
Verzadigd	7,36E-07	1,02E-05	3,49E-04

Tabel 12 Conditionele faalkansen ROT041_24.

Uit de tabel blijkt bovendien dat de faalkansen voor alle belastingstappen relatief laag zijn, maar wel significant toenemen bij toenemende belasting (zowel voor de freatische lijn als voor de verkeerslast). Daarnaast zien we dat de freatische lijn de dominante belasting is, aangezien de faalkansen bij een hogere freatische lijn sterker toenemen dan bij een hogere verkeerslast.

Doorsnede ROT-41_9

Tabel 13 toont voor ROT041_9 de berekende conditionele faalkansen bij de verschillende belastingstappen. Combineren van al deze belastingstappen conform Figuur 30 leidt tot een totale dagelijkse faalkans van $2,22E-02$. Dit leidt tot een totale jaarlijkse faalkans van 1. Nog steeds geldt dat dit een onrealistisch hoge faalkans is, die in de volgende paragraaf wordt aangescherpt op basis van bewezen sterkte.

	VB = 1kN/m²	VB = 5kN/m²	VB = 13kN/m²
Dagelijkse FL	5,46E-06	1,72E-03	6,98E-02
Ontwerp 2020	3,49E-03	1,65E-01	4,71E-01
Verzadigd	1	1	1

Tabel 13 Conditionele faalkansen ROT041_9.

Ook voor deze doorsnede zien we dat de faalkansen significant toenemen bij toenemende belasting (zowel voor de freatische lijn als voor de verkeerslast). Daarnaast zien we dat ook hier de freatische lijn de dominante belasting is.

5.5.6 Stap 3: Bewezen sterkte

In stap 3 zijn de berekende faalkansen aangepast op basis van bewezen sterkte. Dit doen we enkel voor doorsnede ROT041_9, omdat de faalkans van de andere doorsnede (ROT041_24) al zeer klein is, waardoor het toepassen van bewezen sterkte waarschijnlijk weinig invloed heeft.

Voor doorsnede ROT041_9 schatten we in dat de kering in het verleden zonder problemen een boezemwaterstand van -0,85m+NAP heeft gekeerd. Deze waterstand ligt 15cm hoger dan de dagelijkse situatie (streefpeil -1,0m+NAP). Dit noemen we vanaf nu de overleefde situatie. Om bewezen sterkte toe te kunnen passen, zijn eerst de conditionele faalkansen bij de overleefde situatie ingeschat, door te interpoleren tussen de situaties 'dagelijks' en 'ontwerp 2020' (waarbij de β is geïnterpoleerd op basis van de ligging van de freatische lijn, en is verondersteld dat de freatische lijn evenredig stijgt met de boezemwaterstand). Tabel 14 toont de resultaten. De frequentie van de overleefde situatie is ingeschat op eens in de 100 jaar. Dit komt overeen met een dagelijkse overschrijdingskans van: $7/365 * 1/100 = 7/36.500$. Deze overschrijdingskans is ingeschat op basis van het rapport boezempeilstatistiek [HKV, 2020], waarin de boezempeilstatistiek voor 3 punten op de Rotte gegeven is. Bij het dichtstbijzijnde punt voor profiel ROT041_9 komt een waterstand van -0,85m+NAP overeen met een terugkeertijd van $T = 100$ jaar.

Verkeerslast	β	Cond. Faalkans
VB = 1kN/m ²	3,791	7,51E-05
VB = 5kN/m ²	2,229	1,29E-02
VB = 13kN/m ²	0,976	1,65E-01

Tabel 14 Conditionele faalkansen bij overleefde situatie freatische lijn.

Tabel 15 toont een overzicht van de conditionele faalkansen voor de verschillende belastingstappen. De tabel is aangepast ten opzichte van Tabel 13 door twee regels toe te voegen, die beide de resultaten van de overleefde freatische lijn beschrijven. Daarnaast is voor een aantal scenario's de conditionele faalkans op 0 gezet, omdat de betreffende belastingen (belastingcombinaties) in het verleden zonder problemen zijn gekeerd (overleefde scenario's). Voor de freatische lijn is hierboven uitgelegd dat een boezemwaterstand van -0,85m+NAP, met terugkeertijd van $T=100$ jaar, is overleefd. Deze situatie, gecombineerd met een extreem zware verkeerslast (13kN/m²) is waarschijnlijk echter nooit opgetreden. We schatten in dat de waterstand van -0,85m+NAP wel is opgetreden in combinatie met een verkeerslast van 5kN/m². Bij een dagelijkse freatische lijn zal een verkeerslast van 13kN/m² waarschijnlijk wel al zijn opgetreden (en overleefd). Daarom zijn in onderstaande tabel de conditionele faalkansen bij een dagelijkse freatische lijn gecombineerd met alle verkeerslasten gelijkgesteld aan 0, en bij de overleefde freatische lijn (overleefd 1) alleen bij een verkeerslast van 1kN/m² en 5kN/m². Merk op dat in onderstaande tabel ook een regel 'overleefd 2' is toegevoegd, die de resultaten bevat uit Tabel 14, zonder conditionele kansen op 0 te zetten. Dit ten behoeve van het combineren van de conditionele kansen tot een totale faalkans.

	VB = 1kN/m ²	VB = 5kN/m ²	VB = 13kN/m ²
Dagelijkse FL	0	0	0
Overleefd 1	0	0	1,65E-01
Overleefd 2	7,51E-05	1,29E-02	1,65E-01
Ontwerp 2020	1,62E-13	5,05E-12	3,40E-09
Verzadigd	7,36E-07	1,02E-05	3,49E-04

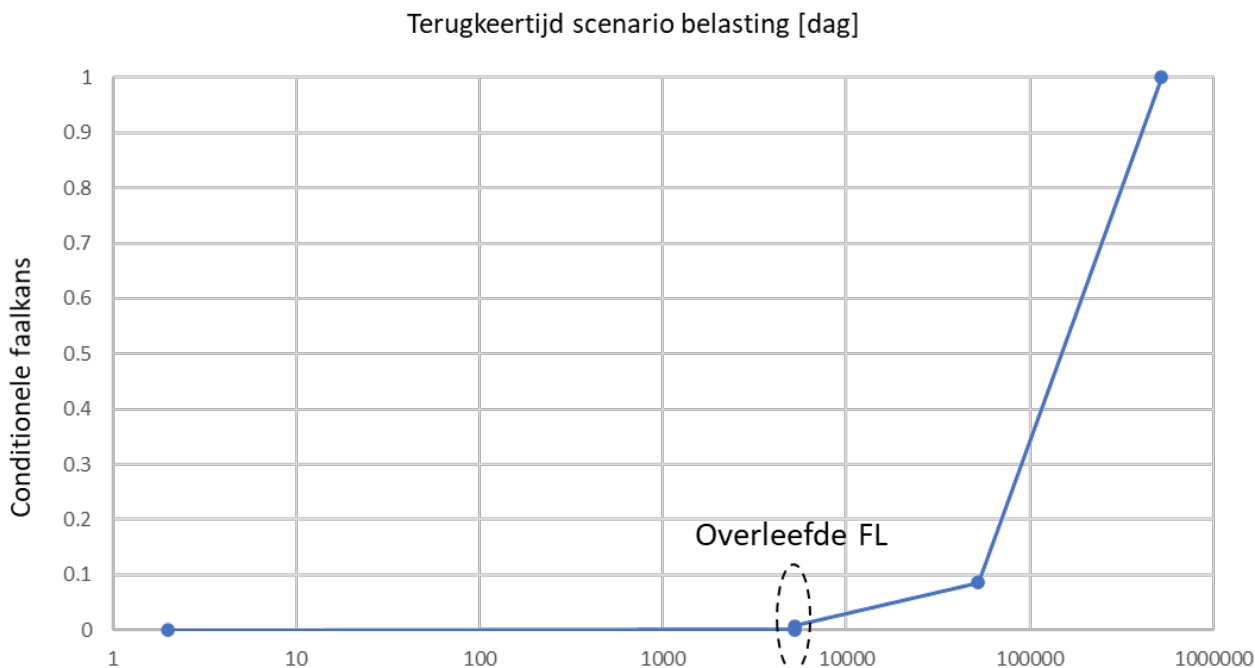
Tabel 15 Conditionele faalkansen ROT041_9.

Net als in stap 2, zijn per situatie van de freatische lijn (per regel in bovenstaande tabel) de conditionele faalkansen gecombineerd tot een totale faalkans gegeven deze freatische lijn. De resultaten per freatische lijn zijn weergegeven in Tabel 16.

Freatische lijn	Kans op FL (per dag)	β	Faalkans gegeven FL
Dagelijkse FL	1/2	-	0
Overleefd 1	7/36.500	3,306	4,73E-04
Overleefd 2	7/36.500	2,459	6,97E-03
Ontwerp 2020	7/365.000	1,368	8,57E-02
Verzadigd	7/3.650.000	-4,288	1

Tabel 16 Faalkansen gegeven freatische lijn.

Op basis van deze resultaten is een fragility curve opgesteld, die de relatie weergeeft tussen de terugkeertijd van de freatische lijn en de conditionele faalkans gegeven die freatische lijn. Deze fragility curve is weergegeven Figuur 31. Bij de terugkeertijd van de overleefde situatie is een kleine sprong in de fragility curve te zien, waar de conditionele faalkans over gaat van een faalkans inclusief bewezen sterkte (overleefd 1) naar een faalkans zonder bewezen sterkte (overleefd 2). De totale dagelijkse faalkans, inclusief bewezen sterkte, is 1,88E-04. De jaarlijkse faalkans bedraagt 6,64E-02 (=1/15).



Figuur 31 Fragility curve over freatische lijn. De x-as beschrijft de inverse van de overschrijdingskans van de belasting in een tijdsperiode van een dag.

We merken op dat bovenstaande methode een relatief simpele, en daarmee grove manier is om bewezen sterkte toe te passen. Voor overleefde belastingen wordt de conditionele faalkans simpelweg op 0 gezet, zonder deze kansruimte te herverdelen (m.a.w. de stelling van Bayes is niet toegepast). De methode is daardoor conservatief. Indien dit leidt tot het gewenste resultaat (voldoende kleine faalkans) volstaat de methode. Indien de faalkans nog steeds hoog is, kan de bewezen sterkte berekening verfijnd worden door 'Bayesian reliability updating' [T. Schweckendiek en W. Kanning, 2017] toe te passen. Hiermee wordt de faalkansruimte voor overleefde belastingen wel herverdeeld, hetgeen resulteert in kleinere faalkansen. Bayesian reliability updating heeft vooral veel invloed (lees: grote aanscherping faalkans) als de stabiliteit van de kering relatief constant is, en dus niet significant afneemt bij oplopende belasting.

Voor het toepassen van 'Bayesian reliability updating' dienen de kansverdelingen voor de verschillende belastingen bekend te zijn. Voor casus Boezemkade - stedelijk zijn deze kansverdelingen bij het uitvoeren van deze pilot onvoldoende bekend, waardoor het niet mogelijk is deze methode toe te passen.

5.5.7 Conclusie probabilistische berekeningen

Tabel 17 toont samenvattend de berekende jaarlijkse faalkansen per doorsnede voor de verschillende stappen. Over het algemeen kan worden gesteld dat het rekenen met variabele verkeersbelasting (stap 2) in plaats van een vaste verkeerslast (stap 1) leidt tot een lagere faalkans. Voor ROT041_9 is dit niet direct zichtbaar, omdat zowel in stap 1 als in stap 2 een jaarlijkse kans van 1 is berekend. Daarom toont Tabel 18 voor ROT041_9 ook de dagelijkse faalkans, waar het verschil tussen stap 1 en stap 2 wel duidelijk zichtbaar is (factor 8).

Daarnaast zien we dat het meenemen van bewezen sterkte (stap 3) leidt tot een verdere reductie van de faalkans (factor 100 tussen stap 2 en stap 3).

Doorsnede	Stap 1	Stap 2	Stap 3
ROT041_24	1/555.000	1/37.600.000	-
ROT041_9	1	1	1/15

Tabel 17 Samenvatting resultaten (jaarlijkse faalkans) probabilistische berekeningen.

Doorsnede	Stap 1	Stap 2	Stap 3
ROT041_9	1/6	1/45	1/5.000

Tabel 18 Dagelijkse faalkansen ROT041_9.

5.6 Faalkans dijktraject

In deze paragraaf zijn alle bovenstaande analyses samengevoegd om een inschatting te maken van de totale faalkans van dijktraject Ommoord. Op basis van de screening (paragraaf 5.3) zijn alleen de faalmechanismen hoogte en binnenwaartse macrostabiliteit relevant voor de faalkans.

Op basis van paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** blijkt dat er voor het faalmechanisme hoogte drie maatgevende locaties/doorsnedes zijn in dijktraject Ommoord. Deze zijn weergegeven in Tabel 19. Voor de ligging van de doorsnedes in het traject wordt verwezen naar Figuur 25 (paragraaf 5.4).

Voor het faalmechanisme hoogte geldt dat de afzonderlijke doorsnedes in hoge mate gecorreleerd zijn, en wel om de volgende redenen:

- De Rotte is een gereguleerd boezemsysteem, waardoor de hydraulische belastingen langs het gehele dijktraject vergelijkbaar zijn.
- De ruimtelijke correlatie ten aanzien van de onzekerheid over het kritiek overslagdebiet kan in navolging van het WBI (primaire keringen) als perfect gecorreleerd beschouwd worden.

In een systeem met hoge correlatie geldt dat het maximum van de afzonderlijke faalkansen (op doorsnedeniveau) een goede schatter is voor de systeemfaalkans (op trajectniveau). Op basis hiervan is de faalkans op trajectniveau voor faalmechanisme hoogte ingeschat op 1/6.100.

Doorsnede	Jaarlijkse faalkans doorsnedeniveau
8	1/13.100
20	1/6.100
24	1/8.340

Tabel 19 Faalkansen op hoogte maatgevende doorsnedes.

In paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is voor het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit de faalkans bepaald voor de twee maatgevende/representatieve doorsnedes. Deze zijn weergegeven in Tabel 20. Voor binnenwaartse stabiliteit zijn de afzonderlijke doorsnedes in veel mindere mate gecorreleerd, en dient rekening te worden gehouden met lengte-effect. In dijktraject Ommoord blijkt echter één doorsnede duidelijk dominant (ROT041_9), die bovendien representatief is voor slechts een zeer klein deel van het dijktraject. Op basis daarvan is de faalkans van deze dominante doorsnede een goede inschatting van de faalkans op trajectniveau. De faalkans op trajectniveau voor binnenwaartse stabiliteit zou volgens de berekeningen dus worden ingeschat op 1/15.

Doorsnede	Jaarlijkse faalkans doorsnedeniveau
ROT041_24	1/37.600.000
ROT041_9	1/15

Tabel 20 Faalkansen maatgevende doorsnedes stabiliteit binnenwaarts.

De totale faalkans van dijktraject Ommoord (combinatie van alle faalmechanismen) ligt tussen de som en het maximum van de afzonderlijke faalkansen op trajectniveau per faalmechanisme. Zowel de som als het maximum van de faalkansen voor hoogte en voor binnenwaartse stabiliteit komen uit op 1/15. De faalkans van dijktraject Ommoord is dus 1/15.

Als nuancering bij deze faalkans merken we op dat deze wordt gedomineerd door het profiel ROT041_9. Zoals eerder opgemerkt in paragraaf 5.3 lijkt een profiel met dergelijk steil binnentalud echter slechts over een zeer kleine strekking (enkele meters) voor te komen. In werkelijkheid ligt een binnenwaartse afschuiving op deze kleine strekking niet voor de hand, door de grote mate van 3D-werking (de omliggende strekkingen zijn breder en hebben een flauwer binnentalud, en daarmee een hogere stabiliteit). Wanneer we deze doorsnede om deze reden niet meenemen voor de beoordeling op binnenwaartse stabiliteit, blijft doorsnede ROT041_24 over als enige representatieve doorsnede, die we representatief kunnen stellen voor het gehele dijktraject Ommoord. De faalkans op trajectniveau voor binnenwaartse stabiliteit bedraagt dan:

$$P_{f,traject} = N * P_{f,ROT041_24}$$

Hierin is N het lengte-effect. Zelfs bij een onrealistisch hoge waarde voor het lengte-effect van N=100, waarmee de faalkans op trajectniveau voor binnenwaartse stabiliteit uitkomt op

1/376.000, is de faalkans voor hoogte (1/6.100) ruim dominant. Bij het niet meenemen van ROT041_09 is de totale faalkans voor dijktraject Ommoord daarom 1/6.100.

5.7 Reflectie op gehanteerde aanpak

In deze paragraaf reflecteren we op de hierboven uitgewerkte aanpak, en bespreken we onze bevindingen, voor de beoordeling op hoogte en binnenwaartse stabiliteit afzonderlijk.

Beoordeling hoogte

In de uitgewerkte aanpak zijn we voor het bepalen van de faalkans op hoogte direct overgegaan op het maken van probabilistische berekeningen, zonder alternatieve beoordelingsmethodes te beschouwen (geen grof-naar-fijn aanpak). Achterliggende reden hiervoor was de inschatting dat deze probabilistische berekeningen relatief eenvoudig zijn, en bovendien direct resulteren in een nauwkeurige inschatting van de faalkans. Bij het uitwerken van de toetsing is gebleken dat dit inderdaad het geval is.

Beoordeling binnenwaartse stabiliteit

De bepaling van de faalkans op binnenwaartse stabiliteit is complexer. Hiervoor zijn probabilistische berekeningen gemaakt, ingedeeld in drie stappen met oplopende complexiteit (één variabele belasting, twee variabele belastingen, bewezen sterkte).

Allereerst merken we op dat het in een daadwerkelijke toetsing zinvol is om eerst te beschouwen of een duidelijk dominante doorsnede relevant is, en pas daarna complexere toetsingsmethodes toe te passen (grof-naar-fijn). In de hierboven uitgewerkte berekeningen blijkt dat ROT041_9 een duidelijk dominante doorsnede is voor binnenwaartse stabiliteit, die de faalkans op trajectniveau bepaalt. In werkelijkheid kan hier waarschijnlijk echter geen afschuiving optreden, waardoor de doorsnede niet relevant is. Het niet meenemen van deze doorsnede in de totale faalkans voor het dijktraject, leidt tot een significant kleinere faalkans. Als we deze doorsnede wel meenemen, zorgt het uitvoeren van complexere toetsmethodes (van stap 1 naar stap 3 in paragraaf 5.6) weliswaar voor een reductie van de faalkans, maar blijft de faalkans relatief hoog.

We merken op dat we ten behoeve van de pilot doorsnede ROLT041_9 in eerste instantie wel als relevant hebben beschouwd, omdat het voor de pilot zinvol is om uit te werken welke beoordelingsmethodes (van simpel tot complex, en daarmee van grof naar fijn) mogelijk zijn voor doorsnedes met een relatief hoge faalkans.

In de berekeningen van paragraaf 5.6 hebben we gezien dat het uitvoeren van complexere toetsmethodes een significante reductie van de faalkans oplevert. Door het werken met meerdere variabele belastingen, en het toepassen van bewezen sterkte, kan de faalkans voor binnenwaartse stabiliteit flink worden aangescherpt. Het is echter niet altijd nodig om complexe rekenmethodes toe te passen. Het is daarom goed om van tevoren, aan de hand van enkele verkennende berekeningen, in te schatten welk detailniveau en welke complexiteit in de berekeningen gewenst is. Dit werken we hieronder verder uit.

Een matrix die de veiligheid van de kade weergeeft ten opzichte van de twee dominante belastingen (freatische lijn en verkeersbelasting), zoals opgesteld in paragraaf 5.5.5, geeft veel informatie, zoals:

- De matrix geeft een beeld van de stabiliteit bij gegeven omstandigheden (belastingen). Dit beeld is wenselijk voor het inrichten van de crisisorganisatie, omdat het inzicht geeft bij welke omstandigheden sprake is van een kritieke situatie;
- Op basis van de matrix blijkt welke belasting dominant is voor de stabiliteit;
- De matrix kan gebruikt worden om de verdere toetsstrategie te bepalen.

Tabel 21 toont een schematisch voorbeeld van een dergelijke matrix. De matrix werkt als volgt: voor 9 combinaties van freatische lijn en verkeerslast (beide met terugkeertijden van 1/10, 1/100 en 1/1.000) wordt de veiligheid (stabiliteit) van de kade berekend, uitgedrukt in stabiliteitsfactor (SF) of betrouwbaarheidsindex (β). De stabiliteitsfactor kan worden bepaald aan de hand van semi-probabilistische berekeningen, met karakteristieke waarden voor de sterkteparameters. Voor de betrouwbaarheidsindex dienen probabilistische berekeningen te worden gemaakt. Dit is weliswaar complexer dan het berekenen van een stabiliteitsfactor, maar resulteert wel direct in de conditionele faalkans en zegt daarmee meer over de absolute veiligheid van de kade. In beide gevallen (zowel SF als β) betreft het de conditionele veiligheid, gegeven een bepaalde combinatie van belastingen. De belastingen worden telkens als determinist ingevoerd in de berekeningen.

		Verkeerslast		
		1/10	1/100	1/1.000
Freatische lijn	1/1.000	SF _{1,1} / β _{1,1}	SF _{1,2} / β _{1,2}	SF _{1,3} / β _{1,3}
	1/100	SF _{2,1} / β _{2,1}	SF _{2,2} / β _{2,2}	SF _{2,3} / β _{2,3}
	1/10	SF _{3,1} / β _{3,1}	SF _{3,2} / β _{3,2}	SF _{3,3} / β _{3,3}

Tabel 21 Matrix veiligheid kade vs. belastingen.

Er zijn verschillende situaties denkbaar, met verschillende benodigde inspanning en complexiteit van de toetsing:

- De veiligheid van de kade is voor alle belastingcombinaties erg hoog. In dat geval volstaat het om enkel de hoogste belastingcombinatie (combinatie van hoge verkeerslast en hoge freatische lijn) te beschouwen in de toetsing. We noemen dit majoreren;
- Eén van de twee belastingen is duidelijk dominant. Zo kan het bijvoorbeeld voorkomen dat de veiligheid van de kade nauwelijks verandert bij een hogere freatische lijn, maar wel bij een hogere verkeerslast. In dat geval kunnen we majoreren ten aanzien van de freatische lijn (niet-dominante belasting), dat wil zeggen dat we alleen de hoogste freatische lijn beschouwen in de toetsing. De verkeerslast (dominante belasting) kunnen we dan wel als variabele meenemen. Zo ontstaat als het ware een 2D fragility curve (conditionele faalkans ten opzichte van de dominante belasting);
- De veiligheid van de kade is sterk afhankelijk van beide belastingen. Zowel voor hogere verkeerslasten als voor een hogere freatische lijn neemt de veiligheid significant af. In dat

geval kunnen we niet majoreren, en dienen alle belastingcombinaties te worden beschouwd voor een goede inschatting van de faalkans. Omdat de veiligheid bovendien significant afneemt met hogere belastingen, is bewezen sterkte weinig relevant. De hogere belastingcombinaties, die dominant zijn voor de totale veiligheid, zijn namelijk nog niet opgetreden;

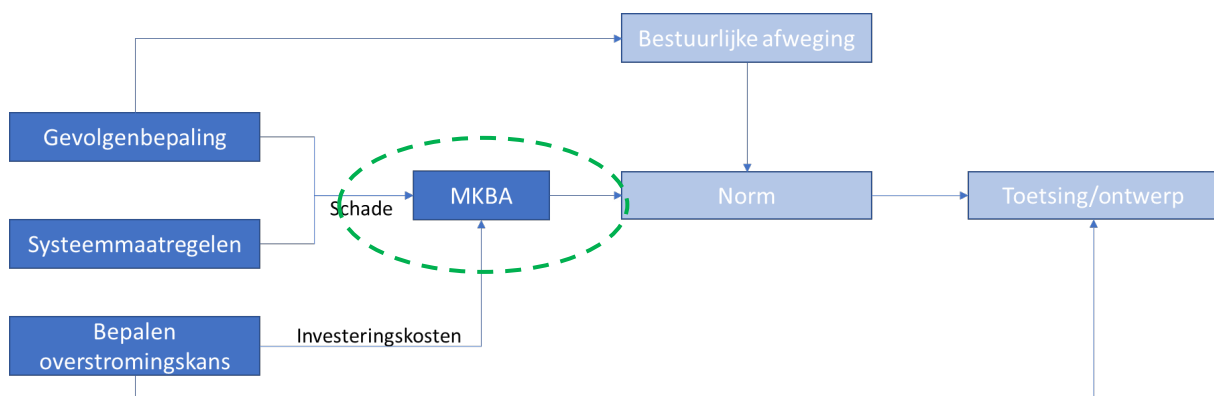
- De veiligheid van de kade hangt nauwelijks af van de hoogte van de belasting, en is bij alle belastingcombinaties laag. Ook in dit geval dienen alle belastingcombinaties te worden beschouwd in de toetsing. In dit geval is bewezen sterkte echter wel relevant.

6 MKBA

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is op basis van de bouwstenen uit voorgaande hoofdstukken een MKBA (maatschappelijke kosten-batenanalyse) uitgevoerd, die resulteert in een kosten-optimale norm, de toegestane overstromingskans die leidt tot de laagste totale kosten. De kosten-optimale norm is afzonderlijk bepaald voor ontwerp- en toetsingsdoeleinden. De normen die worden afgeleid in dit hoofdstuk zijn overstromingskansnormen.

Figuur 32 illustreert de rol van de MKBA in de veiligheidsbenadering. De combinatie van gevolgenbepaling en systeemmaatregelen bepaalt de gevolgschade van een keringdoorbraak, die als input dient in de MKBA. Het bepalen van de overstromingskans geeft informatie over de investeringskosten. Op basis van de gevolgschade en de investeringskosten wordt vervolgens de MKBA uitgevoerd, waaruit de kosten-optimale norm volgt. Dit is de norm waarbij de totale kosten minimaal zijn. Uiteindelijk wordt op basis van de kosten-optimale norm en een bestuurlijke afweging een definitieve norm vastgesteld.



Figuur 32 Rol van de MKBA in de veiligheidsbenadering.

6.2 Ontwerpnorm

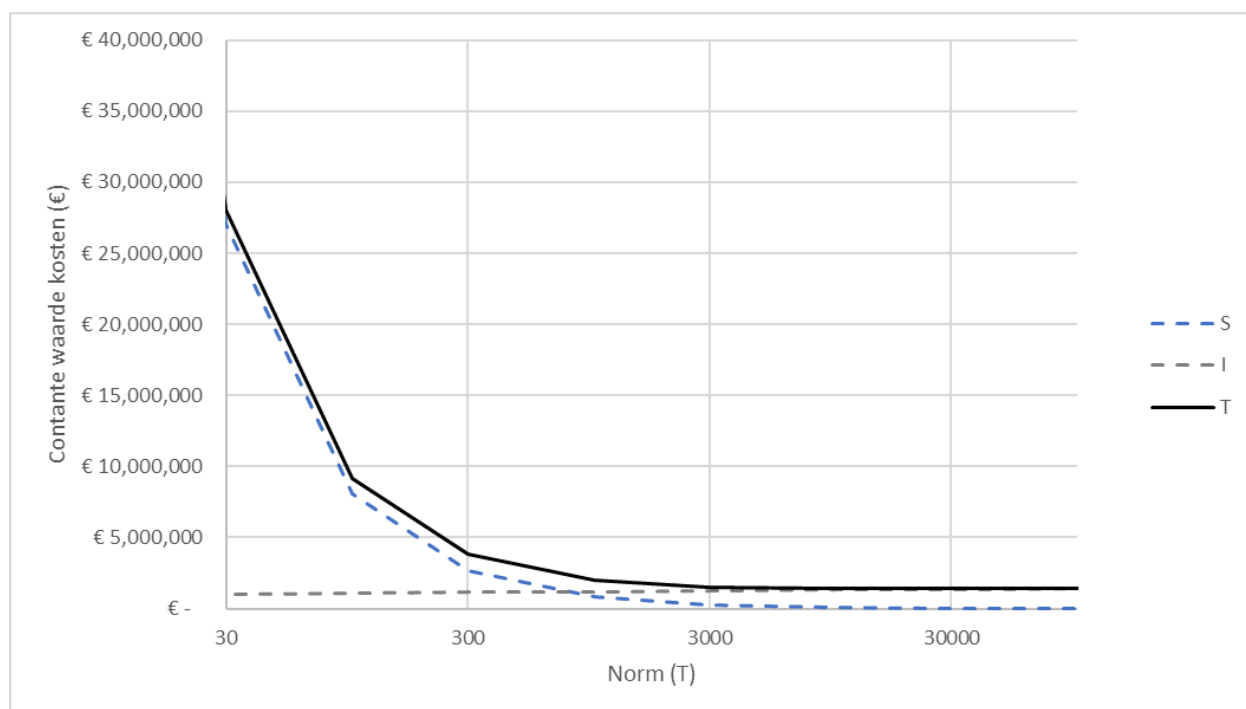
De optimale ontwerpnorm beschrijft op welke norm een kering het best ontworpen kan worden (vanuit de MKBA-optiek), gegeven dat een versterking nodig is. De optimale ontwerpnorm is afgeleid in een MKBA-analyse, die is weergegeven in Figuur 33. De figuur toont de contante waarde van de schade (S), de investeringskosten (I), en de totale kosten (T), uitgezet tegen de norm. De optimale norm is de norm waarbij de contante waarde van de totale kosten het laagst is. Dit is het geval bij een overstromingskansnorm van 1/10.000 per jaar (T=10.000 jaar).

Aan onderstaande figuur liggen de volgende veronderstellingen ten grondslag:

- De contante waarde is bepaald op basis van een oneindige tijdshorizon;
- Potentiële schade is constant in de tijd verondersteld, de schade bedraagt €22 miljoen, zoals bepaald in hoofdstuk 3;
- Potentiële schade is onafhankelijk verondersteld van de norm, omdat sprake is van een boezemstelsel met gereguleerd peil. Er sprake van beperkte waterstandsvariatie bij veranderende norm.

- Overstromingskans is constant in de tijd verondersteld;
- De discontovoet is 2,5% per jaar;
- Verondersteld is dat de investeringskosten van een dijkversterking gemiddeld €1.000.000 bedragen, wanneer de afmetingen van de versterkingen zodanig zijn dat de kering voldoet aan een overstromingskansnorm van 1/100 per jaar. Daarnaast is verondersteld dat de investeringskosten voor een versterking tot aan een factor 10 strengere norm, 10% hoger zijn (grotere afmetingen nodig). Hierbij is uitgegaan van een levensduur van de versterking van 100 jaar, hetgeen betekent dat een dergelijke investering elke 100 jaar nodig is (om te zorgen voor een overstromingskans die gelijk is in de tijd). De investeringskosten zijn ingeschat op basis van kentallen die het waterschap heeft aangeleverd: gemiddelde kosten voor het ophogen van de kade (tot aan leggerhoogte) bedragen €110 per strekkende meter, kosten voor verflauwing van het binnentalud (tot aan leggerprofiel) €460 per strekkende meter. Deze kentallen stammen uit de versterking van dijktraject Ommoord in 2020. In deze pilot is uitgegaan van een gemiddelde investering van €400/m. Met een trajectlengte van 2500m komt dit neer op een totale investering van €1.000.000. Als pragmatische keuze is hier een overstromingskansnorm van 1/100 aan gekoppeld.

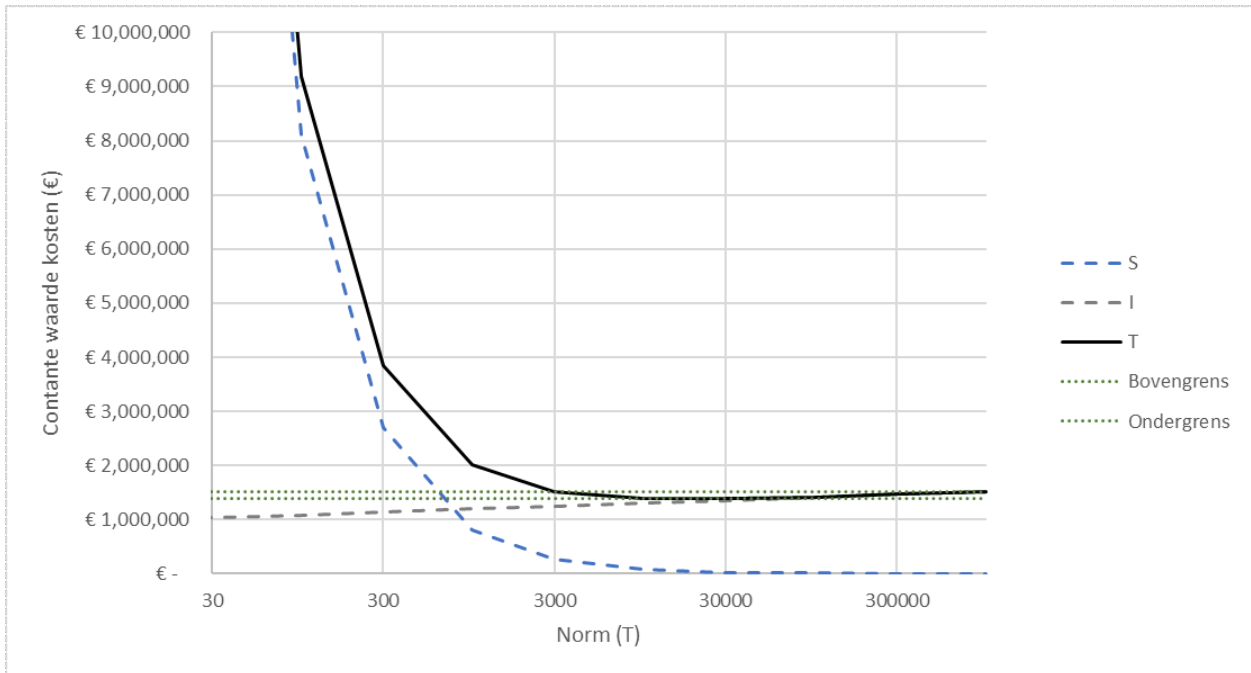
We merken op dat voor de investeringskosten eenvoudige aannames zijn gedaan, die volstaan voor het doel van deze pilot. Voor toekomstige casussen/normeringen, wordt aanbevolen de investeringskosten te bepalen op basis van de bouwsteen 'bepalen overstromingskans', zoals eerder beschreven.



Figuur 33 MKBA ontwerpnorm.

Bij bovenstaande moet worden opgemerkt dat de totale kosten (T) zeer vlak verlopen. Het verschil in totale kosten tussen een norm van $T=10.000$ en $T=100.000$ is bijvoorbeeld maar beperkt. Dit is geïllustreerd in Figuur 34. Figuur 34 bevat dezelfde kostenfuncties/lijnen als Figuur 33. Aanvullend is een bandbreedte van 10% op de minimale contante waarde getoond in groen. Achterliggende gedachte hierbij is als volgt: de optimale ontwerpnorm is $T=10.000$, omdat de contante waarde van de totale kosten hier minimaal is. Een contante waarde van 10% hoger heeft weinig praktische betekenis. Deze bandbreedte in de contante waarde is getoond met de groene lijnen. Bij deze

bandbreedte hoort een range in normen tussen $T=3.000$ en $T=500.000$. Binnen deze range ligt de contante waarde van de totale kosten binnen een marge van 10%.



Figuur 34 Bandbreedte 10% MKBA.

6.3 Toetsnorm

De optimale toetsnorm kan in formulevorm worden uitgerekend, aan de hand van investeringskosten (I) en baten (B), uitgaande van de eerder gehanteerde modelmatige aannamen ten aanzien van de tijdhorizon, discontovoet, etc. De optimale toetsnorm is de overstromingskans waarbij de contante waarde van het risico zo hoog is (geworden), dat baten van versterking opwegen tegen de totale versterkingskosten (vaste en variabele kosten). Dit is de overstromingskans waarvoor geldt dat $I = B$.

$$I = I_0 + I' * H$$

$$B = \frac{(P_0 - P_{nieuw}) * S}{d}$$

Waarin:

- I_0 Vaste investeringskosten
- I' Variabele investeringskosten
- H Hoogte (of mate van sterkte van de kering)
- P_0 Faalkans vlak voor versterken
- P_{nieuw} Economisch optimale faalkans na versterken
- S Schadebedrag overstroming
- d discontovoet

Uitgaande van $P_{nieuw} \ll P_0$, kunnen we dit herleiden tot:

$$P0 = \frac{I}{S} * d$$

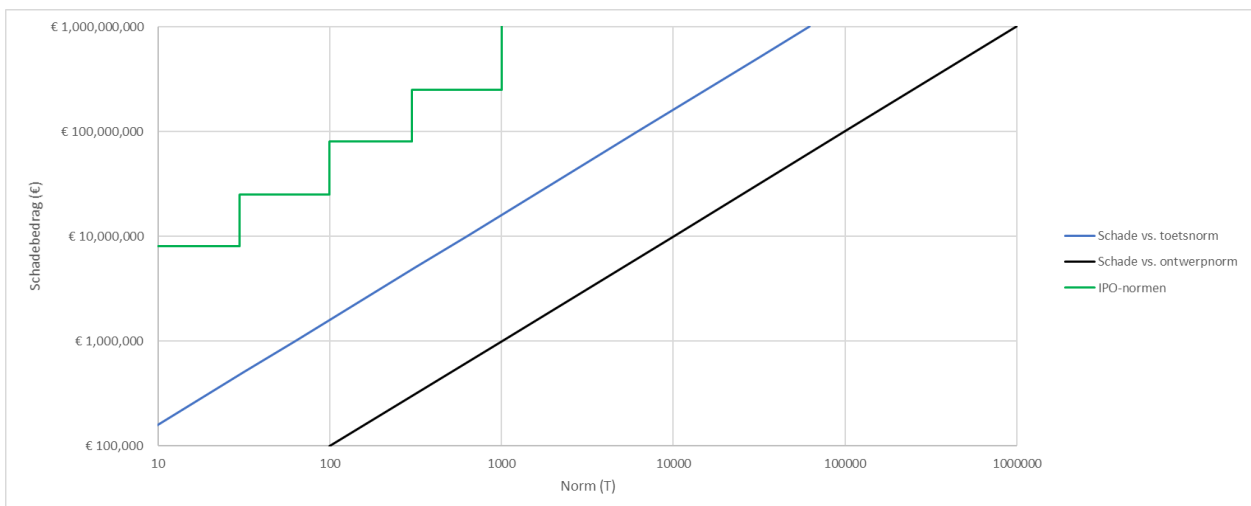
Invullen van deze vergelijking voor de casus Boezemkade - stedelijk leidt tot een optimale toetsnorm (P0) van T=1.385. Als we, net als bij de ontwerpnorm, beschouwen wat een 10% afwijking in kosten (hogere kosten) voor invloed heeft op de toetsnorm, zien we dat de toetsnorm oploopt tot T=1.525. De bandbreedte is dus significant kleiner dan bij de ontwerpnorm.

6.4 Relatie tussen schade en optimale overstromingskans

In bovenstaande paragrafen zijn ontwerp- en toetsnormen afgeleid op basis van de potentiële overstromingsschade die voor casusgebied Boezemkade - stedelijk is bepaald (zie hoofdstuk 3). In Figuur 35 is voor verschillende normen het bijbehorende acceptabele schadebedrag getoond, zowel voor de toetsnorm als voor de ontwerpnorm. Hiertoe is in de hierboven beschreven analyses het schadebedrag gevarieerd, en daarbij is telkens de kosten-optimale toets- en ontwerpnorm afgeleid. Hieruit blijkt duidelijk dat de ontwerpnormen strenger zijn (kleinere overstromingskans) dan de toetsnormen. Met andere woorden, als eenmaal een versterking nodig is, kan beter tot een hogere norm worden versterkt.

Daarnaast zijn in onderstaande figuur de bandbreedtes in schade bij de huidige IPO-normen weergegeven. Hierbij is enigszins pragmatisch verondersteld dat de overschrijdingskans (IPO-norm) gelijk is aan de overstromingskans. Het valt duidelijk op dat de huidige IPO-normering tot minder strenge normen leidt dan de nieuw afgeleide normen op basis van de MKBA.

We merken op dat wanneer we bij de IPO-norm en factor 5 tussen overschrijdingskans en overstromingskans veronderstellen, conform [STOWA, 2009], de IPO-norm wat dichterbij de afgeleide toetsnorm toeschuift, maar nog steeds leidt tot minder strenge normen. De genoemde factor van 5 is echter nooit wetenschappelijk onderbouwd.



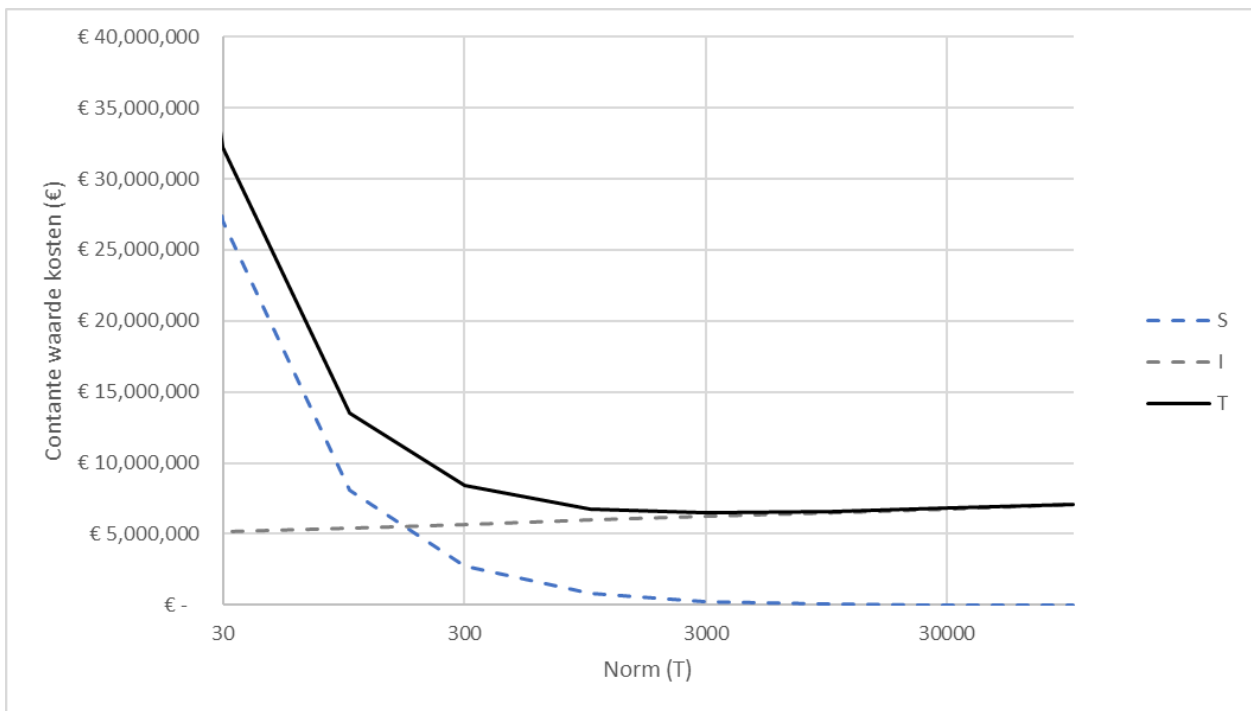
Figuur 35 Norm vs. schade.

6.5 Gevoeligheidsanalyse

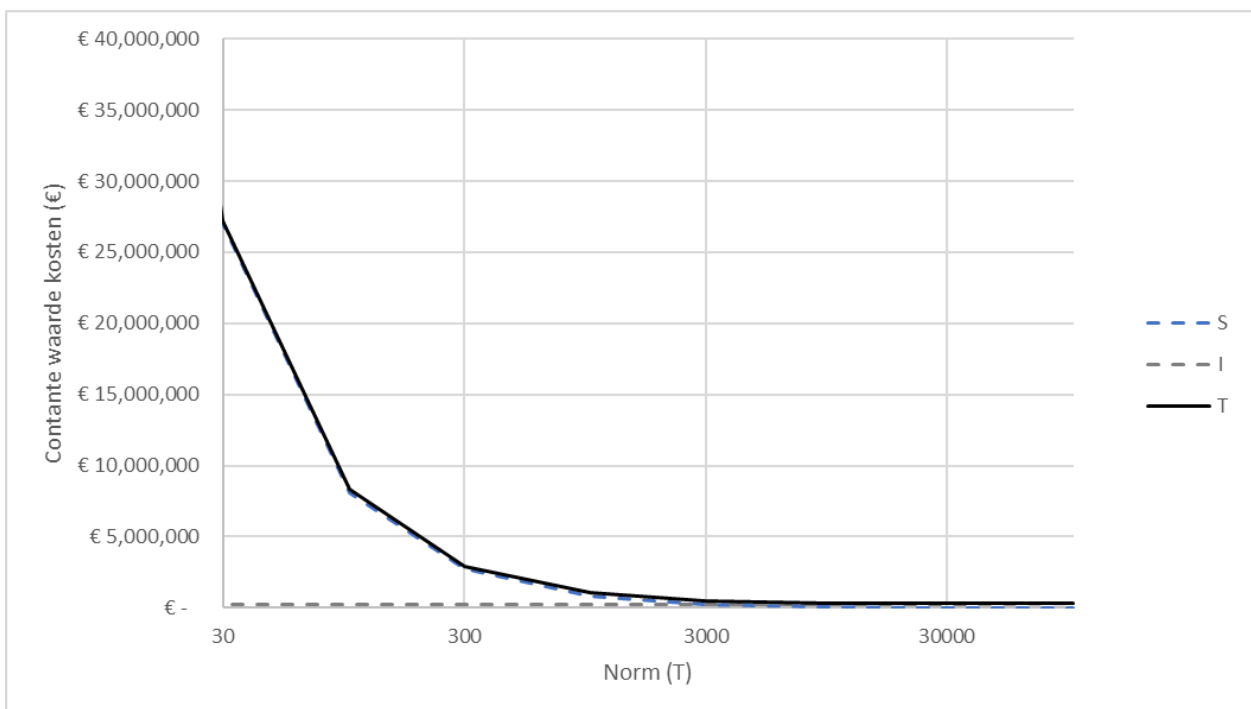
Aan de MKBA-studie die in dit hoofdstuk is uitgevoerd, liggen een aantal aannames ten grondslag, zoals opgesomd in paragraaf 6.2. In deze paragraaf is middels een gevoeligheidsanalyse de gevoeligheid van de optimale ontwerpnorm onderzocht, door deze aannames te variëren.

Investeringskosten

Als eerste stap is gevarieerd met de investeringskosten. Figuur 36 en Figuur 37 tonen de contante waarde van de schade bij respectievelijk factor 5 hogere en factor 5 lagere investeringskosten (elke 100 jaar). Bij hogere kosten daalt de optimale norm van $T=10.000$ naar $T=3.000$, en bij lagere kosten stijgt deze naar $T=100.000$. Het belangrijkste is echter dat de grafieken nauwelijks veranderen van vorm; de totale kosten verlopen zeer vlak, waardoor de bandbreedte voor de optimale norm zeer groot is. De optimale norm blijft min of meer in dezelfde bandbreedte vallen. De investeringskosten hebben dus weinig invloed op de optimale norm.

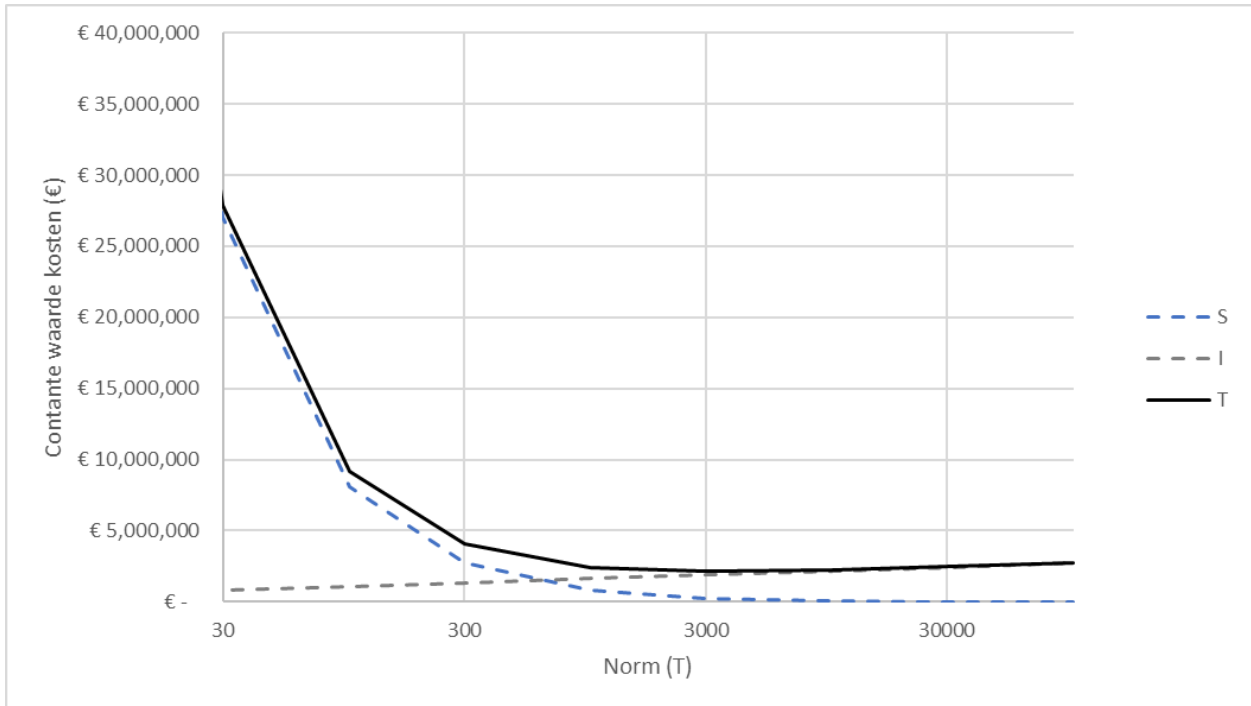


Figuur 36 Factor 5 hogere investeringskosten.



Figuur 37 Factor 5 lagere investeringskosten.

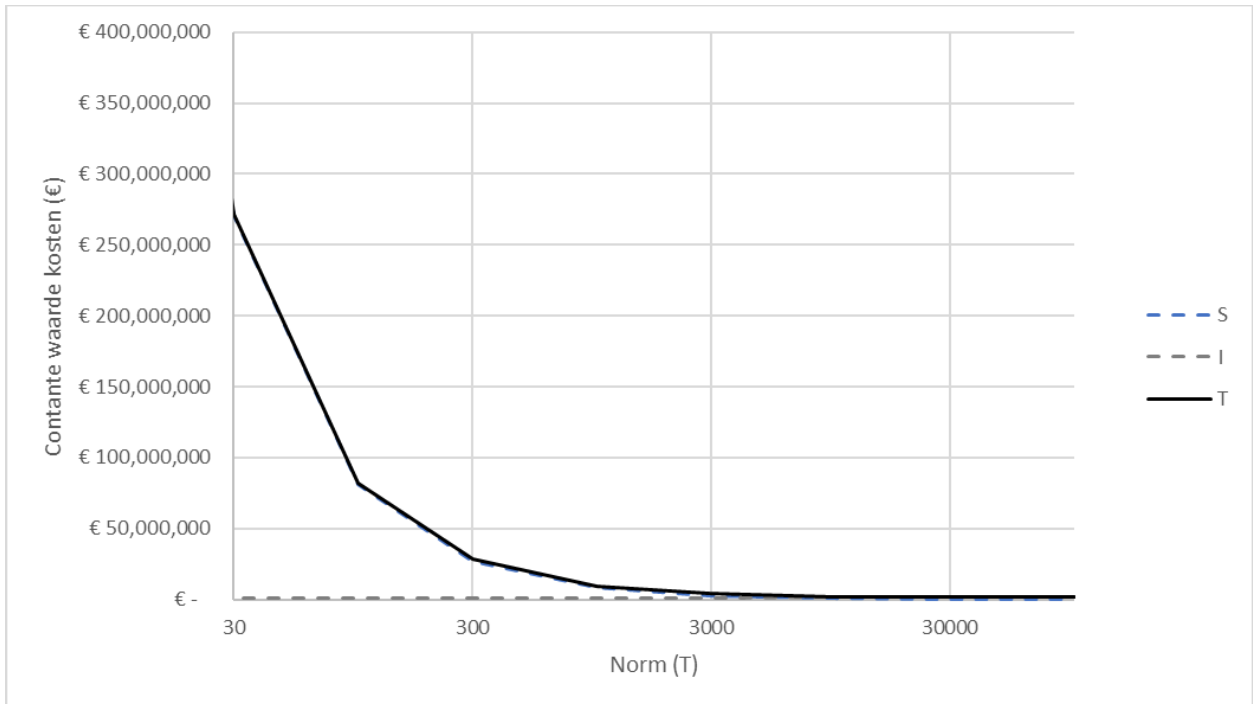
In Figuur 38 is het verschil in investeringskosten tussen verschillende normen vergroot met een factor 5 (van 10% hogere kosten bij een factor 10 strengere norm naar 50% hogere kosten bij een factor 10 strengere norm). De optimale ontwerpnorm is $T=3.000$, en ook hier geldt dat het verloop van de totale kosten zeer vlak blijft lopen.



Figuur 38 Verschil investeringskosten tussen verschillende normen factor 5 hoger.

Schadebedrag

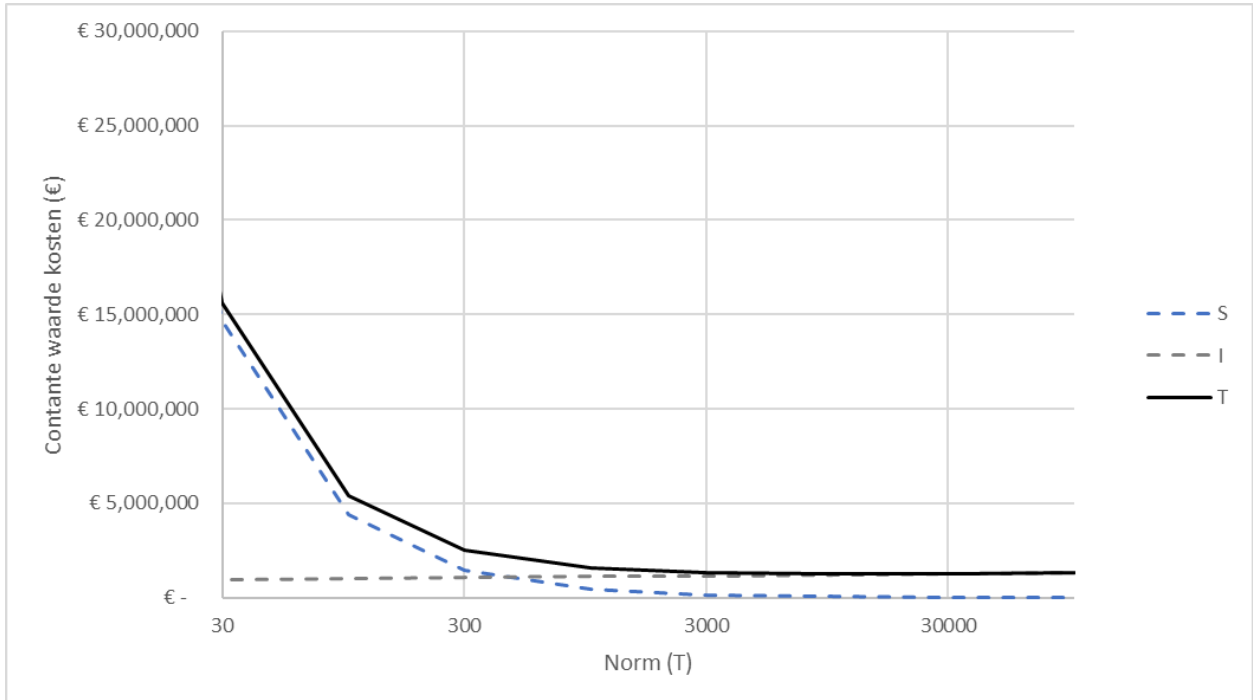
In Figuur 39 is het potentieel schadebedrag gevarieerd. Hier is gerekend met een factor 10 hoger schadebedrag. De optimale ontwerpnorm stijgt van $T=10.000$ naar $T=100.000$, maar de grafiek van de totale kosten blijft zeer vlak lopen, waardoor de optimale norm in dezelfde bandbreedte blijft vallen. Met andere woorden, het verschil in totale kosten tussen een $T=10.000$ norm (oorspronkelijk optimum) en $T=100.000$ norm is relatief klein.



Figuur 39 Schadebedrag factor 10 hoger.

Discontovoet

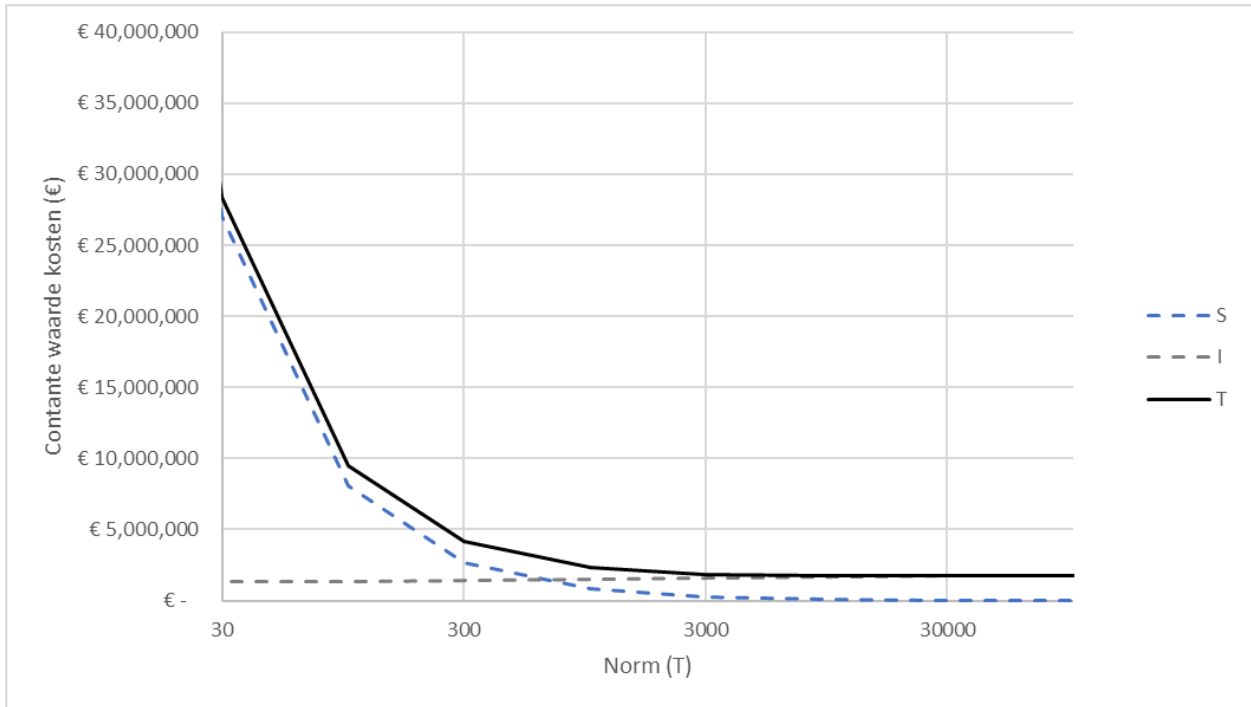
In Figuur 40 is de discontovoet met een factor 2 verhoogd. De optimale ontwerpnorm blijft op $T=10.000$ liggen, en bovendien blijft de grafiek met totale kosten zeer vlak lopen.



Figuur 40 Discontovoet factor 2 hoger.

Investeringsperiode

In Figuur 41 is de investeringsperiode verlaagd van 100 jaar naar 50 jaar. Dit betekent dat elke 50 jaar een versterking nodig is. De bijbehorende investeringskosten zijn gelijk gehouden. De optimale ontwerpnorm blijft bij deze variatie op $T=10.000$ liggen, en de grafiek van totale kosten blijft zeer vlak lopen.

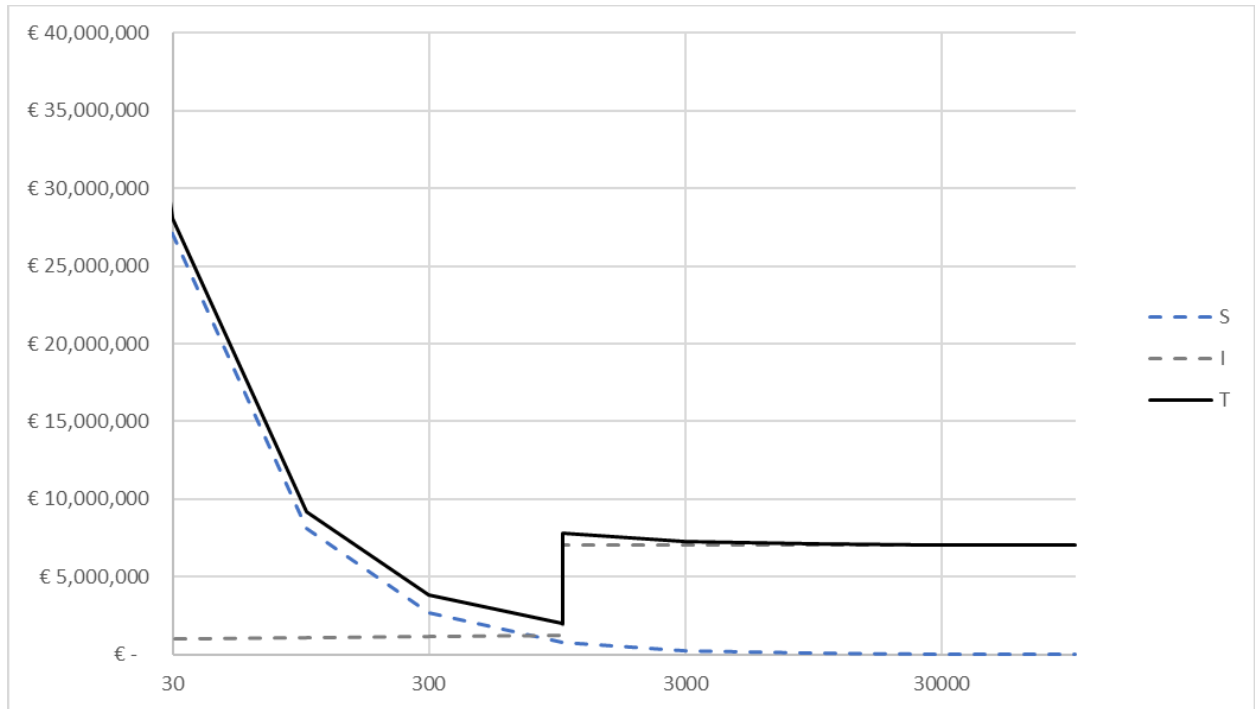


Figuur 41 Investeringsperiode 50 jaar.

Damwand

In de oorspronkelijke MKBA is verondersteld dat het mogelijk is voor elke norm te versterken door middel van een grondoplossing. In werkelijkheid zou het kunnen dat vanaf een bepaalde norm een grondoplossing niet meer voldoende is, maar een versterking in de vorm van een damwand nodig is. Deze variant is in Figuur 42 weergegeven, waar is verondersteld dat vanaf een norm van $T=1.000$ een versterking met damwand nodig is. Verondersteld is dat een damwand een levensduur heeft van 50 jaar, en de investeringskosten €5.000.000 bedragen. Daarnaast is verondersteld dat de investeringskosten niet verschillen afhankelijk van de norm.

Uit de figuur blijkt dat optimale norm vlak voor het omslagpunt van grondoplossing naar damwand ligt. Dit is te verklaren door het feit dat een versterking vanaf dit omslagpunt ineens veel duurder wordt.



Figuur 42 Vanaf T=1.000 investering in damwand nodig.

Conclusie

Op basis van bovenstaande analyses blijkt dat de aannames in de MKBA-studies slechts beperkte invloed hebben op de optimale ontwerpnorm. Daarnaast blijkt dat het voor de ontwerpnorm belangrijk is in welke vorm een versterking kan worden uitgevoerd.

7 Conclusie en reflectie

In de voorgaande hoofdstukken zijn verschillende bouwstenen uit de veiligheidsbenadering uitgewerkt. Reflecterend op de uitgevoerde analyses, valt het volgende op:

- In de MKBA-analyse zien we dat de optimale ontwerpnorm bij een factor 10 verschil in gevolgschade nog steeds in dezelfde bandbreedte ligt. Het is daarom maar zeer de vraag hoe gedetailleerd de schade bepaald dient te worden. Het is aan te bevelen dit nader te beschouwen aan de hand van alle vier de pilots gecombineerd.
- In deze pilot zien we dat systeemmaatregelen geen significante invloed hebben op het schadebedrag. Dit is het geval specifiek voor de casus Boezemkade - stedelijk, omdat in korte tijd na de doorbraak al het grootste deel van het water de achterliggende polder is ingestroomd. Voor andere dijktrajecten hoeft dit niet per definitie het geval te zijn, en hebben systeemmaatregelen mogelijk meer invloed.
- De werkwijze om in de bepaling van de overstromingskans te starten met een screening om de relevante faalmechanismen en vakken te bepalen, en vervolgens een grof-naar-fijn methode toe te passen, is doelmatig en goed uitvoerbaar. Het is aan te bevelen om voorafgaand aan toekomstige toetsingen/beoordelingen steeds de afweging te maken welk detailniveau benodigd is, en de werkwijze hierop aan te passen.
- Gezien de grote bandbreedte die we zien in de kosten-optimale ontwerpnorm (MKBA), is het de vraag of een faalkans wel tot in detail bepaald dient te worden. Misschien volstaan grovere schattingen van de faalkans. Het is aan te bevelen dit nader te beschouwen aan de hand van alle vier de pilots gecombineerd.
- In de bepaling van de overstromingskans hebben we probabilistische berekeningen gemaakt voor binnenwaartse macrostabiliteit, waarin we zowel de verkeersbelasting als de freatische lijn als variabele belasting hebben geschematiseerd. De kansinschatting (overschrijdingskans) van de combinatie van freatische lijn en verkeerslast is enigszins subjectief. Over deze inschatting is een brede consensus nodig.

8 Referenties

HKV, 2020

WSA Schielandse boezem. Januari 2020. PR3777.10

Nelen en Schuurmans, 2018

Overstromingsscenario's regionale waterkeringen. In opdracht van Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard. 25 januari 2018. RO244

Witteveen+Bos, 2012

Detailtoets boezemkaden Rotte-Oost. In opdracht van Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard. 8 februari 2012. DT263-76

RPS, 2020

Ontwerprapportage kadeverbetering Rottekade. 3 januari 2020. Referentie: 1601310A28-R20-XXX

HHSK, 2012

Legger van de waterkeringen, katern: Rottekaden. Maart 2012.

Kuijper, 2021

PROMOTOR gebruikershandleiding; versie 4.3. HKV lijn in water, rapport PR 4347.20. November 2021.

NEN997-1+C2, 2017

Geotechnisch ontwerp van constructies, Deel 1: Algemene regels. 2017

T. Schweckendiek en W.Kanning, 2017

Reliability updating for slope stability of dikes. Deltares, 2017

STOWA, 2015

Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, Module C: Sterkte. 2015

STOWA, 2009

Materiaalfactoren boezemkaden, 2009

STOWA, 2008

Richtlijn – Normering keringen langs regionale rivieren

Bas Kolen et al, 2019

Bas Kolen, Robin Nicolai, Rob Koeze, Leon Valkenburg. Waterrisico's bij ruimtelijke ontwikkelingen en assets, City Deal Klimaatadaptatie. Juli 2019

Ambient, 2021

Opdrachtomschrijving begeleidingscommissie doorontwikkeling Waterschadeschatter. 13 oktober 2021

Jongejan, 2020

Alternatieve beoordelingsmethoden bij overstromings- of overschrijdingskansnormen. 17 maart 2020

HKV, 2022

Memo Verschilanalyse Waterschadeschatter en SSM-2017, Jakolien Leenders, 5 augustus 2022

Rapport

Projectnummer: 51005833

Referentienummer: NL22-648800269-18283

Datum: 04-03-2022

Pilot veiligheidsbenadering regionale keringen

Uitwerking onderzoeksvragen pilotlocatie “Regionale rivier – landelijk”



Opdrachtgever:
STOWA
Stationsplein 89
3818 LE AMERSFOORT

Revisiebeheer

Revisie	Datum	Status	Belangrijkste wijzigingen
C0.1	23-08-2021	Werkdocument	
C0.2	06-09-2021	Werkdocument	Hoofdstuk 4 en 5 aangevuld
C0.3	20-09-2021	Werkdocument	Hoofdstuk 5 aangevuld
C0.4	01-10-2021	Werkdocument	Hoofdstuk 5 aangevuld
C0.5	01-11-2021	Werkdocument	Hoofdstuk 5 aangevuld
C0.6	24-12-2021	Werkdocument	Hoofdstuk 6 en 7 aangevuld
C1.0	17-01-2021	Concept	Eerste complete conceptversie
C2.0	04-02-2022	Concept	Tweede conceptversie, inhoudelijke aanpassen Hoofdstuk 6 en 7
C3.0	04-03-2022	Definitief	Reviewcommentaar verwerkt

Verantwoording

Titel	Pilot veiligheidsbenadering regionale keringen
Subtitel	Uitwerking onderzoeksvragen pilotlocatie “Regionale rivier – landelijk”
Projectnummer	51005833
Referentienummer	NL22-648800269-18283
Revisie	3.0
Datum	04-03-2022

Auteur	Maurits Kampen en Martine Stam
E-mailadres	waterbouw@sweco.nl

Gecontroleerd door
Paraaf gecontroleerd

Goedgekeurd door
Paraaf goedgekeurd

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Pilotlocatie	8
1.3	Doel	8
1.4	Leeswijzer	9
2	Werkwijze	10
3	Schade	11
3.1	Scope.....	11
3.2	Watersysteem.....	11
3.3	Overstromingsmodel	13
3.4	Schadebepaling	16
3.5	Afgeleide IPO-normering	36
4	Maatregelen watersysteem	39
4.1	Scope.....	39
4.2	Bestaande maatregelen	39
4.3	Mogelijke maatregelen	39
5	Medegebruik	42
5.1	Scope.....	42
5.2	Verschillende soorten eisen	42
5.3	Verschillende soorten medegebruik	43
5.4	Betrouwbaarheid volgens Eurocode en IPO-normering.....	43
5.5	Verhouding eisen medegebruik versus waterveiligheid	47
6	Overstromingskans	54
6.1	Keuze methode overstromingskansbenadering	54
6.2	Uitgangspunten.....	58
6.3	Methode instandhoudingsprofiel.....	59
6.4	Instandhoudingsprofiel	62
6.5	Hoogte	64
6.6	Faalkansbepaling macrostabiliteit binnenwaarts	67
6.7	Faalkansbepaling piping	73
6.8	Gecombineerde faalkans overstromingsgebied	78
6.9	Conclusie	79
7	Kosten-batenanalyse	80
7.1	Scope.....	80
7.2	Kosten dijkversterking	80

7.3	Baten dijkversterking	84
7.4	Optimale ontwerpnorm	85
7.5	Optimale toetsnorm	87
7.6	Koppeling met toetsing	88
8	Conclusies.....	90
8.1	Kader	90
8.2	Schadebepaling	90
8.3	Watersysteem maatregelen.....	91
8.4	Eisen medegebruik	91
8.5	Overstromingskans	92
8.6	Kosten-batenanalyse	93
9	Beschouwingen en aanbevelingen	95
9.1	Schades	95
9.2	Maatregelen watersysteem	95
9.3	Medegebruik	95
9.4	Toetsing	96
9.5	Optimale norm/kosten-baten analyse.....	97
10	Referenties	98

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Nederlandse waterkeringsysteem bestaat onder andere uit primaire, regionale en overige keringen. Voor de primaire waterkeringen is recent (2017) overgestapt van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering per dijktraject. Voor regionale keringen wordt momenteel uitgegaan van een overschrijdingskansbenadering. Voor de regionale keringen is verkend op welke wijze de vigerende veiligheidsbenadering kan worden aangepast. Op basis van die verkenning is geconcludeerd dat een regionale benadering wenselijk is, die recht doet aan de verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen. Ten behoeve van de invulling van de specifieke regionale benadering zijn vier pilots uitgevoerd, waarin een top 4 met denkbare aanpassingen zijn uitgetoetst. Voor een goed landelijk beeld zijn hiervoor 2 typen regionale keringen beschouwd, en 2 typen beschermde gebieden. Aldus resulteren 4 pilots, te weten:

- Boezemkade – landelijk: een kade langs een boezem die een landelijk gebied beschermd;
- Boezemkade – stedelijk: een kade langs een boezem die een stedelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – landelijk: een kering langs een regionale rivier die een landelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – stedelijk: een kering langs een regionale rivier die een stedelijk gebied beschermd.

Onderzoeksvragen

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de aanpassing van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. Daartoe zijn de volgende denkbare aanpassingen onderzocht:

- normeren:
 - o uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming, zowel binnen als buiten het overstroomde gebied;
 - o rekening houden met maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
 - o medegebruik: kan medegebruik maatgevende eisen stellen aan de kering die moeten worden meegewogen bij de normstelling van de kering uit oogpunt waterveiligheid;
 - o de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses);
- toetsen:
 - o werkwijzen voor de toetsing.

Afhankelijk van de aard van de pilot zijn binnen de uitwerking de accenten op verschillende onderdelen gelegd. Zo is in één pilot veel aandacht besteed aan het rekening houden met slachtoffers, terwijl in een andere bijvoorbeeld de meerwaarde van een gedifferentieerde (per faalmechanisme) normering. Ook zijn de wijzen waarop is geverifieerd op de sterkte van de kering aan de norm voldoet op verschillende wijzen uitgewerkt, teneinde de bruikbaarheid van enkele (internationale) werkwijzen voor zo'n verificatie te verkennen. Hoewel de pilots dus generiek van opzet zijn, verschillen het detailniveau waarin de onderzoeksvragen zijn uitgewerkt.

Sweco heeft in samenwerking met het Waterschap Hunze en Aa's de pilot "Regionale rivier – landelijk" uitgewerkt. In deze pilot worden denkbare bouwstenen voor een nieuwe veiligheidsbenadering uitgetoetst. De hieruit opgedane inzichten moeten bijdragen aan de besluitvorming omtrent de veiligheidsbenadering voor regionale keringen. Dit rapport beschrijft de bevindingen.

Disclaimer

Voor de uitwerking van de pilots is gebruik gemaakt van werkelijke dijkvakken en beschermde gebieden. Het doel van de pilots is de toegevoegde waarde, de haalbaarheid en de consequentie van verschillende aanpassingen van de toets- en normeringsmethodes te onderzoeken. Het verkrijgen van een gedetailleerd en accuraat beeld van de actuele waterveiligheid in de pilotgebieden was nadrukkelijk niet het doel. Uit oogpunt van doelmatigheid van de uitwerking zijn uitgangspunten soms vereenvoudigd of zijn (soms grove) aannamen gedaan, daar waar dat acceptabel was uit oogpunt van de doelstelling van de pilots. Daarmee hebben de resultaten zoals de optimale normen en het aangetoonde veiligheidsniveau geen betekenis voor de beschouwde pilotgebied. Benadrukt wordt daarom dat geen van de conclusies uit dit rapport gebruikt kunnen worden om conclusies aan te verbinden over de beschouwde pilotgebieden.



Figuur 1-1: Pilotlocatie (rood omrand)

1.2 Pilotlocatie

De pilotlocatie “Regionale rivier - landelijk” betreft de rivier de Hunze en ligt in het grensgebied van Drenthe en Groningen, ten oosten van de Hondsrug. Ten zuiden van het Zuidlaardermeer wordt de rivier ook wel Oostermoerse Vaart genoemd en ten noorden van het Zuidlaardermeer het Drentsche Diep. De pilotlocatie is opgenomen in Figuur 1-1.

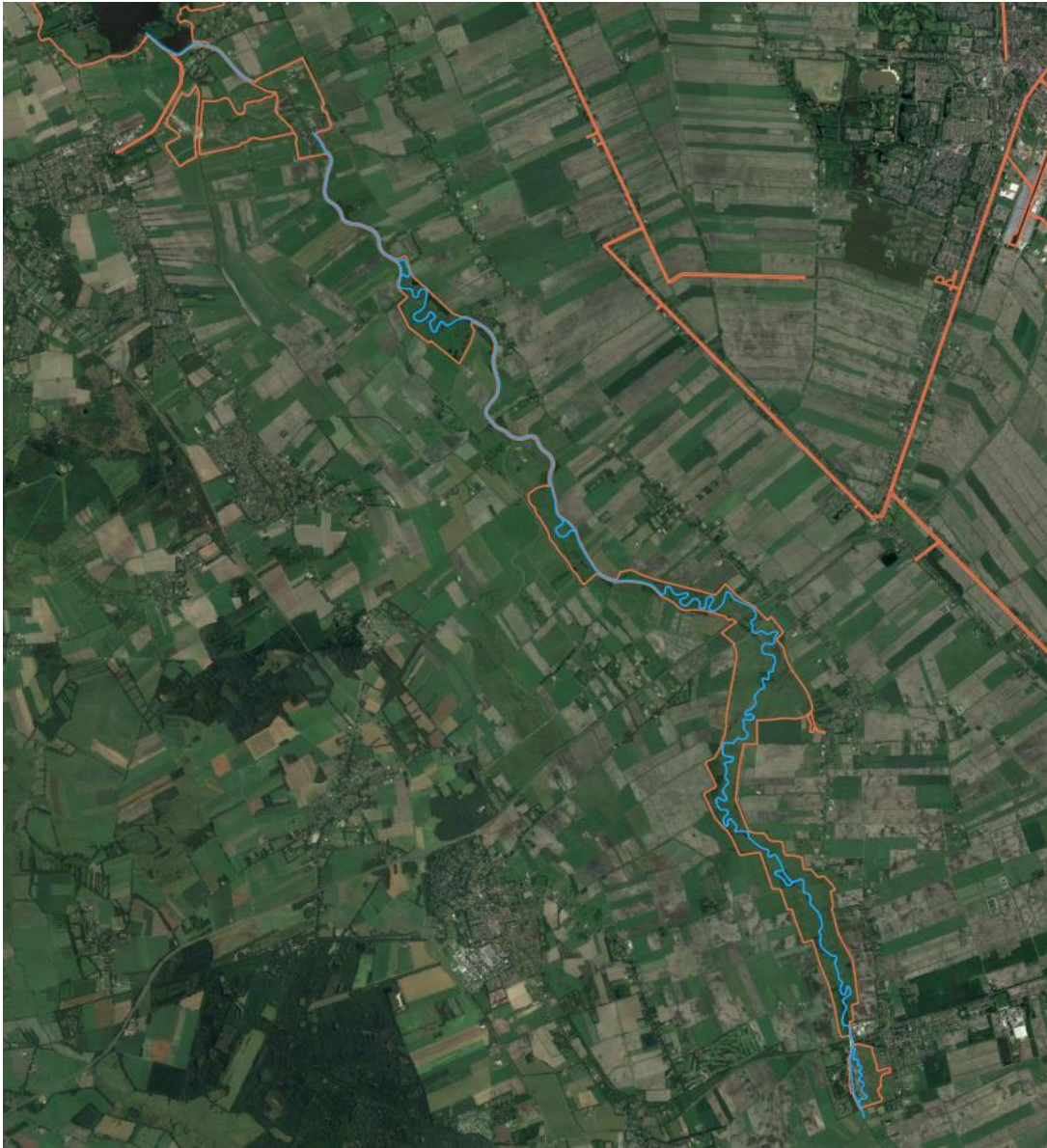
Het Hunzedal rondom de huidige rivier is waarschijnlijk in de voorlaatste ijstijd ontstaan, veroorzaakt door een ijslob. Vervolgens is in de laatste interglaciale periode een groot deel van het dal gevuld geraakt met zand. Dit is vermoedelijk ook de periode dat het rivierenstelsel is ontstaan. In het Holoceen ontwikkelde zich in het Hunzedal een hoogveengebied, dat in de 19^e en 20^e eeuw grotendeels is afgegraven [4].

Oorspronkelijk liep de Hunze tot aan de Waddenzee. Het was een meanderende rivier die in de 20^e eeuw op veel plekken is gekanaliseerd en rechtgetrokken. Begin 21^e eeuw is de Hunze op een aantal plekken weer in meanderende staat teruggebracht. De Hunze begint ter hoogte van Gasselternijveen, waar het Voorste Diep en Achterste Diep bij elkaar komen. Kwelwater uit de Hondsrug draagt het meest bij aan het debiet in de Hunze. Daarnaast levert in het zomerhalfjaar RWZI Gieten een significante bijdrage aan de afvoer [5]. In de pilot wordt het gedeelte van de Hunze beschouwd tussen Gasselternijveen tot waar de rivier uitmondt in het Zuidlaardermeer, met een totale lengte van circa 30 km. In deze rapportage wordt in het vervolg met “Regionale rivier - landelijk” dit gedeelte bedoeld.

Langs de Hunze ligt een regionale kering met een overschrijdingskans van $T=100$ jaar [1]. De rivier de Hunze en de regionale keringen van Waterschap Hunze en Aa's zijn weergegeven in Figuur 1-2.

1.3 Doel

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. In de pilots is het daarom van belang te benoemen welke aannames aan bepaalde werkzaamheden ten grondslag liggen en waar tegenaan gelopen wordt gedurende de uitwerking. De exacte uitkomsten zijn daaraan van ondergeschikt belang. Ten behoeve van de invulling van een eventueel nieuwe veiligheidsbenadering worden er vier pilots uitgevoerd voor verschillende waterschappen/regio's, die samen recht doen aan de verscheidenheid van regionale keringen en regionale watersystemen.



Figuur 1-2: Rivier de Hunze (blauw) en regionale keringen Waterschap Hunze en Aa's (oranje) [1]

1.4 Leeswijzer

Deze rapportage doorloopt alle onderzoeksvragen die voor deze pilot zijn gesteld. In hoofdstuk 2 wordt de werkwijze toegelicht en worden de onderzoeksvragen benoemd. In hoofdstuk 3 wordt de eerste deelvraag omtrent de bepaling van de schade behandeld. In hoofdstuk 4 worden de maatregelen besproken die mogelijk kunnen worden genomen bij een doorbraak. Hoofdstuk 5 beschrijft het medegebruik in het Hunzegebied. Alle deelvragen vormen de opzet voor het bepalen van de overstromingskans, die in hoofdstuk 6 wordt bepaald. In hoofdstuk 7 en 8 volgen de kosten-batenanalyse en de conclusies.

2 Werkwijze

Om te komen tot een nieuwe veiligheidsbenadering worden er vijf onderzoeksvragen uitgewerkt voor de pilotlocatie. Hiervoor worden documenten gebruikt die door het Waterschap Hunze en Aa's en STOWA beschikbaar zijn gesteld. Gedurende het project zullen nieuwe inzichten en werkrichtingen binnen de pilots met elkaar gedeeld worden.

De vijf onderzoeksvragen die behandeld gaan worden in het pilotgebied zijn:

- Schade – berekening van directe en indirecte schades en de uitwerking hiervan op de IPO-normering langs de Hunze.
- Watersysteemmaatregelen – mogelijke maatregelen om gevolgen te beperken en de (eventuele) uitwerking hiervan op de IPO-normering langs de Hunze.
- Eisen medegebruik – eisen gesteld door het medegebruik aan de stabiliteit/vervorming van de waterkering en het mogelijk maatgevend zijn hiervan.
- Overstromingskans – relatie tussen de overstromingskans van een gebied en eisen aan de waterkering; hoe kan beoordeeld worden of sterkte van kering voldoet aan de genormeerde overstromingskans voor een gebied.
- Kosten-batenanalyse – het bepalen van de economisch optimale ontwerp- en toetsnorm, op basis van investeringskosten en risico.

3 Schade

3.1 Scope

Dit hoofdstuk gaat op het volgende in:

- Doel: vergelijking maken tussen de vigerende aanpak voor normering versus het afleiden van een normering waarbij rekening is gehouden met indirecte gevolgen.
- Te beschouwen: indirecte effecten/schade buiten het beschermde te overstromen gebied, kentallen voor inschatting schade, werkwijze voor borging in normering.

In dit hoofdstuk komen achtereenvolgens een beschrijving van het watersysteem, het overstromingsmodel en de schadebepaling aan bod. Vervolgens is voor zowel directe schade als indirecte schade een IPO-klasse afgeleid per dijkvak.

3.2 Watersysteem

3.2.1 Algemeen

De Hunze (zoals die binnen de pilot beschouwd wordt) loopt vanaf het samenkomen van de twee bovenlopen Voorste Diep en Achterste Diep tot aan het Zuidlaardermeer. Aan de westzijde van de Hunze ligt de Hondsrug, aan de oostzijde de voormalige hoogveengebieden. Het Voorste Diep stroomt vanaf Schoonoord uit een dal in de Hondsrug, het Achterste Diep begint bij Exloo. Vanuit de Hondsrug komt geïnfiltreerde neerslag als kwel omhoog in het Hunzedal [4][5]. Samen met regenwater zijn dit de belangrijkste bronnen van watertoevoer. Een andere bron is de RWZI Gieterveen, die ter hoogte van Gieterveen het gezuiverde effluent loost op de Hunze. Tijdens een relatief droge zomer bestaat het debiet van de Hunze tot 40% uit water afkomstig uit de RWZI [5][6].

Tussen Gasselternijveen en Gieterveen is het verhang relatief groot. De maatgevende hoogwaterstanden lopen hier over circa 8 km af van NAP +4,5 m naar NAP + 2,2 m (zie Figuur 3-6). In die zin is dit watersysteem anders dan gebruikelijke polders in het westen van het land. Na Gieterveen loopt de Hunze verder tot een maatgevende hoogwaterstand van NAP +1,5 m ter hoogte van het Zuidlaardermeer.

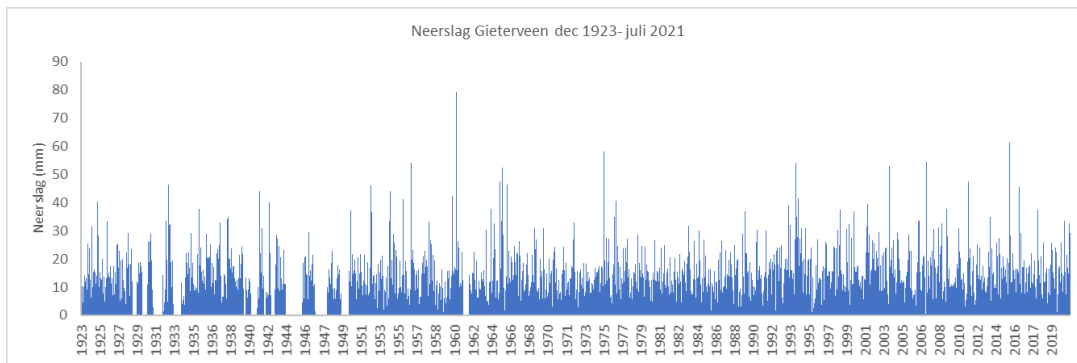
3.2.2 Mogelijke overstromingen

Mogelijke hoogwaters en daarmee overstromingen van de oevers van de Hunze kunnen twee oorzaken hebben. Dit betreft enerzijds extreme neerslag, waarbij de afvoer onvoldoende is en de Hunze buiten zijn oevers treedt. Anderzijds betreft dit een hoogwater op het Zuidlaardermeer, waardoor de waterstanden op de Hunze aan de kant van het meer stijgen. Een hoogwater op het Zuidlaardermeer wordt veroorzaakt door hoge waterstanden op zee, waardoor niet gespuid kan worden vanuit het boezemsysteem.

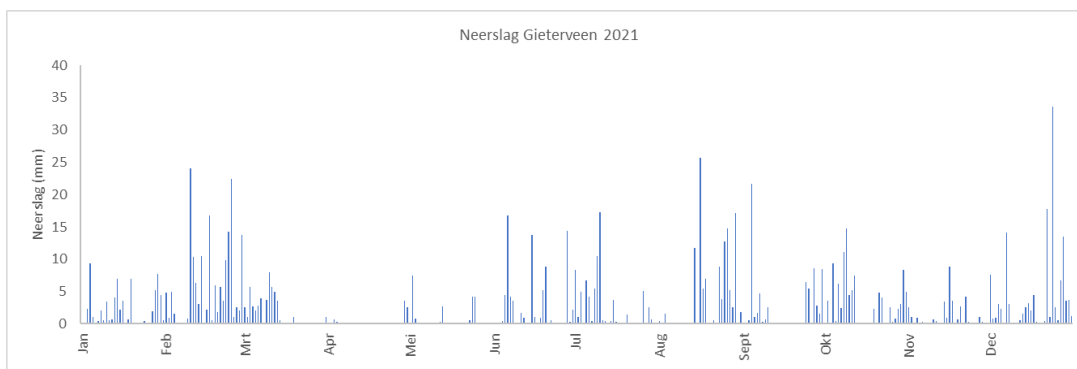
3.2.2.1 *Neerslag*

In Gieterveen bevindt zich een KNMI-meetstation. De gemeten neerslag vanaf december 1923 is weergegeven in Figuur 3-1. De hoogst gemeten neerslag was 79,3 mm in 24 uur op 4 december 1960. De neerslag over 2020 is weergegeven in Figuur 3-2. Zoals te zien is in Figuur 3-3, is de neerslag in de (na)zomermaanden gemiddeld het hoogst.

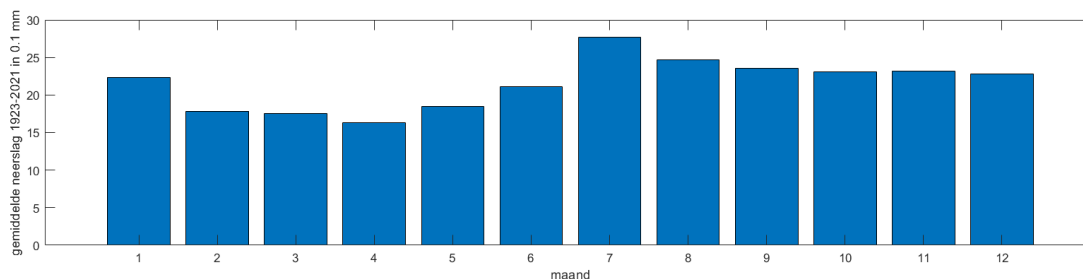
Overigens is nog een aantal andere weerstations in de omgeving beschikbaar (Eelde, Onnen, Veendam) om een beter beeld te krijgen van de ruimtelijke variatie van de neerslag. In het kader van de pilot is dit niet verder onderzocht.



Figuur 3-1 Neerslag over 24 uur in millimeter 1923-2021, gemeten in Gieterveen. Bewerking van [7]



Figuur 3-2: Neerslag over 24 uur in millimeter 2020, gemeten in Gieterveen. Bewerking van [7]



Figuur 3-3: Gemiddelde neerslag per maand over 24 uur in 0,1 mm, gemeten in Gieterveen. Bewerking van [7]

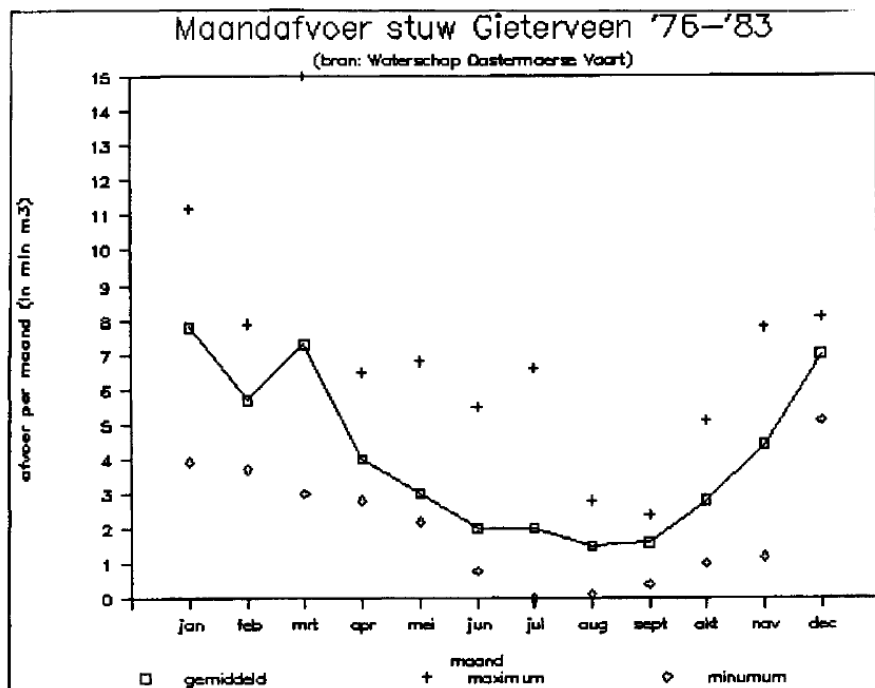
3.2.2.2 Hoogwater Zuidlaardermeer

Het Zuidlaardermeer maakt deel uit van de Eemskanaalboezem en daarom fluctueert het waterpeil over het algemeen weinig [5]. Het streefpeil bedraagt NAP +0,53 m. Volgens het waterschap kan het peil oplopen bij een hoogwater op zee, waarbij niet gespuid kan worden vanuit het boezemsysteem. Dit kan tot twee weken duren. Het maatgevend hoogwater waarvoor de regionale kering rekening mee wordt gehouden bedraagt NAP +1,5 m.

3.2.3 Inschatting debiet

Op moment van schrijven is er bij Sweco weinig actuele informatie bekend over de afvoer van de Hunze. In Figuur 3-4 is een gedateerd overzicht opgegeven van maandafvoeren ter plaatse van Gieterveen (N.B. dit is vóór het terugbrengen van de Hunze in meanderende staat). De hoogste afvoer vindt plaats in de winterperiode. In de zomerperiode is de gemiddelde afvoer een stuk lager. Hieruit blijkt ook dat de Hunze gedreven wordt door kwel uit de Hondsrug: in de zomer is de toevoer van water door verdamping minder. Overigens komen de gemeten maxima in juni en juli dichtbij de gemiddelde afvoeren in de winter.

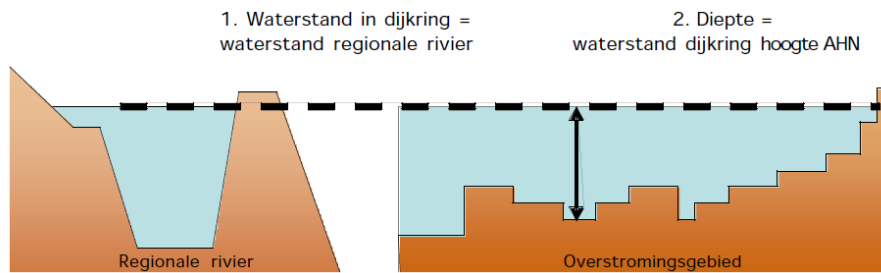
Afgaande op de figuur is het gemiddelde debiet over het jaar circa 1,5 m³/s. Het maximum en minimum reiken tot respectievelijk 4,2 m³/s en vrijwel 0 m³/s. Deze getallen geven een ordegrootte van de afvoer van de Hunze.



Figuur 3-4: Maandafvoer Gieterveen 1976-1983 [8]

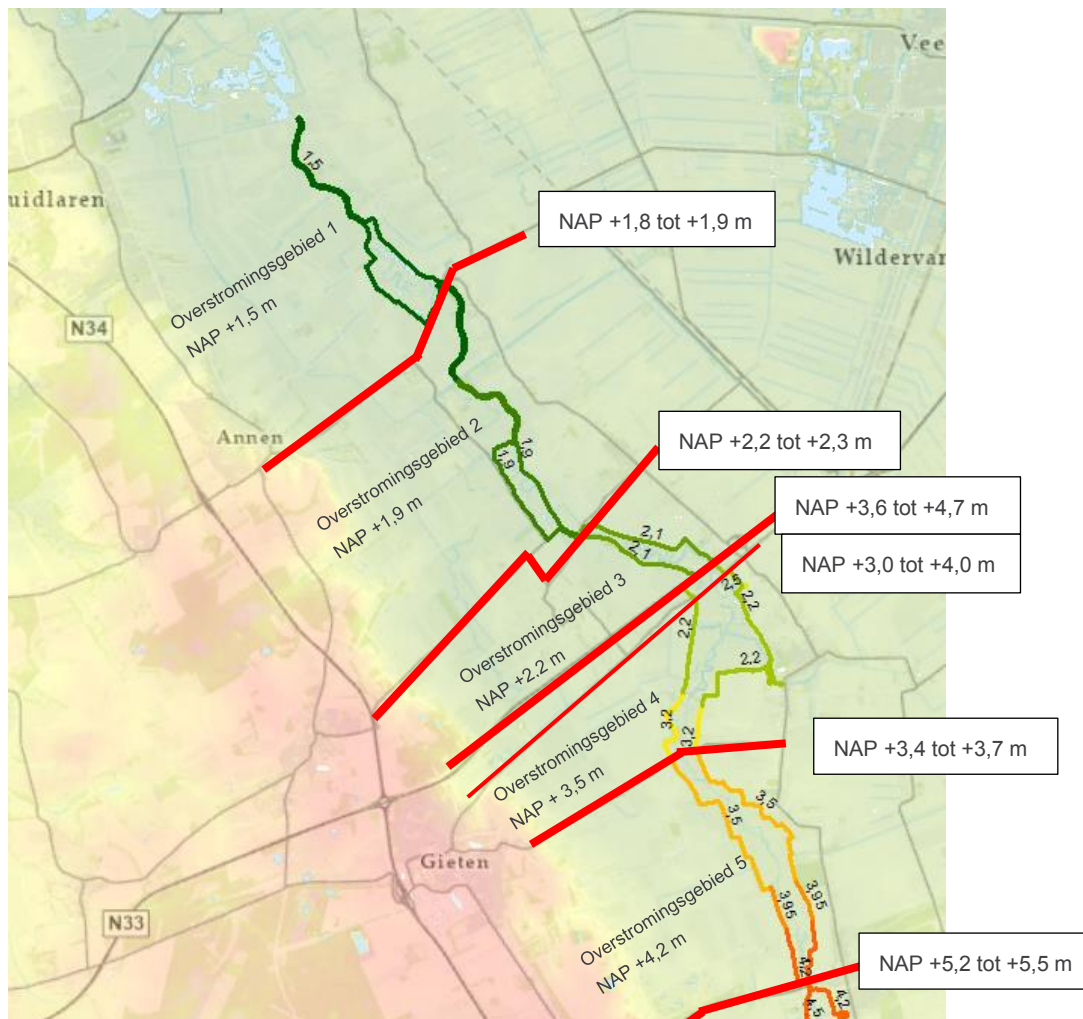
3.3 Overstromingsmodel

Van de Hunze zijn geen overstromingsberekeningen beschikbaar. Langs de Hunze gelden verschillende maatgevende hoogwaterstanden vanuit de toetsing van de keringen, zie Figuur 3-6. Voor een simpel overstromingsmodel ten behoeve van deze studie is gebruik gemaakt van Variant A uit het rapport Richtlijn Normering keringen langs regionale rivieren [1], waarbij de waterstand in het gebied gelijk is getrokken aan de waterstand in de rivier. Hiervoor is in ArcMap op basis van het AHN3 uitgetekend welke gebieden bij een bepaalde waterstand in de Hunze onder water komen te staan, waarbij de te overstromen gebieden wel in direct contact met de Hunze moeten staan. Hierbij wordt aangenomen dat het waterpeil in de Hunze constant blijft en niet zakt door een breuk of overlopen van de kades.



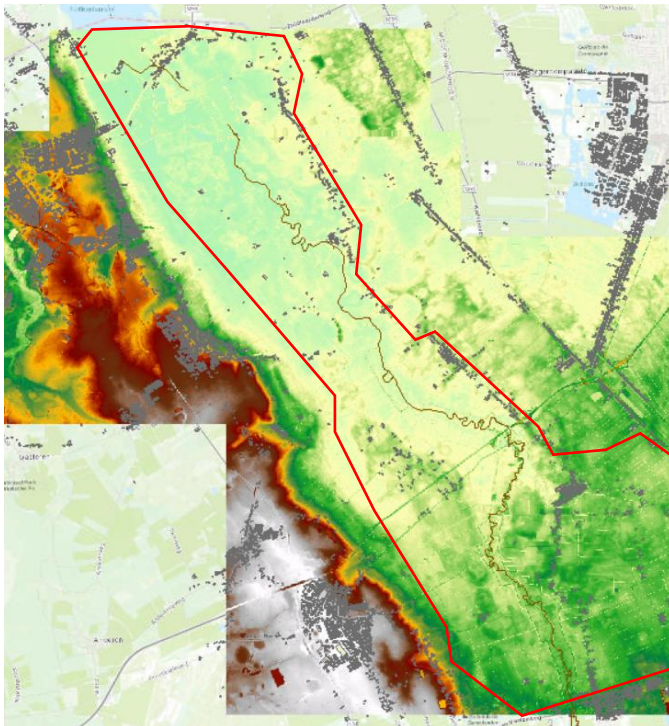
Figuur 3-5 Variant A overstromingsmodel Richtlijn Normering keringen langs regionale rivieren [1]; Bepalen overstromingsdiepte op basis van maximale waterstand in rivier.

Het stroomgebied is opgedeeld in dijkvakken/overstromingsgebieden, waarbij het achterland bijvoorbeeld begrensd wordt door een hoger gelegen gedeelte (veelal wegen op een grondlichaam), zie Figuur 3-6. De overstromingsdiepte wordt bepaald door het maatgevende hoogwater in dat dijkvak.



Figuur 3-6 Stroomingsgebied opgedeeld in meerdere dijkvakken/overstromingsgebieden met een bijbehorende maatgevende waterstand. De wegen vormen hiertussen de barrières (weergegeven zijn de hoogtes van de wegen in NAP+m).

In paragraaf 0 zijn de ondergelopen gebieden met resulterende waterdiepte zichtbaar. De maximale contour van het te overstroomde gebied is weergegeven in Figuur 3-7. Deze contour is bepaald door de fictieve situatie dat de gebieden grenzend aan de Hunze vollopen tot aan een waterstand gelijk aan het maatgevend hoogwater per overstromingsgebied. De overstroming beperkt zich tot het Hunzedal en wordt aan de westzijde begrensd door de Hondsrug, in het oosten door het voormalige hoogveen.



Figuur 3-7 Contour gecombineerde overstromingsgebied (rood) geplot op AHN3 met BGT gebouwen

Aannames overstromingsmodel

- De hoger gelegen weglichamen zorgen voor het inbakemen van overstromingsgebieden. Openingen, zoals duikers en sifons, zullen bij doorbraak dan gesloten moeten worden. Op basis van de open data van Waterschap Hunze en Aa's bedraagt het aantal duikers (die dan dus van afsluiters moeten zijn voorzien) dwars door het weglichaam veelal minder dan vijf per overstromingsgebied.
- Overloop of bresvorming leidt niet tot een verlaging van het peil op de Hunze.
- Er is genoeg toevoer van water om de waterstanden in de overstromingsgebieden te doen stijgen tot een peil gelijk aan maatgevend hoogwater op Hunze.
- Zodra in één overstromingsgebied een overstroming plaatsvindt, treedt dit niet meer op in andere overstromingsgebieden.
- Afgaande op het ingeschatte debiet in de Hunze zijn de te verwachten waterdieptes en stroomsnelheden klein (zie ook onderstaande kanttekening bij het overstromingsmodel). Hieruit is de aanname dat een overstroming geen slachtoffers tot gevolg zal hebben. Het gebruik van een simpel overstromingsmodel (waarin stromingsnelheden niet kunnen worden gemodelleerd) is dan geoorloofd.

Kanttekeningen gehanteerde overstromingsmodel

- Stroomsnelheden zitten niet in het gehanteerde overstromingsmodel en kunnen dus niet meegenomen worden in de schatting van de schade.
- Gemiddeld over de vijf overstromingsgebieden bedraagt de overstroming 900 ha. Bij een inundatiediepte van 0,5 m is er een volume van 4,5 mln m³ water nodig om te vullen vanuit de Hunze. Met een debiet van 4 m³/s duurt dit 52 dagen. Het bereiken van dusdanige waterdieptes is daarom niet realistisch. Het bereiken van 0,1 m inundatie duurt al ruim tien dagen. Het gehanteerde overstromingsmodel, en daarmee input voor de Waterschadeschatter, zal daarom leiden tot een overschatting van de economische schades.

3.4 Schadebepaling

In de schadebepaling wordt er een onderscheid gemaakt tussen directe en indirecte schade. Directe schade wordt gezien als schade aan objecten. Indirecte schade zijn de kosten door uitval van bijvoorbeeld infrastructuur. Daarnaast wordt er onderscheid gemaakt in slachtoffers en getroffen. Slachtoffers zijn personen die door een overstroming in het gebied zullen komen te overlijden; in het geval van de Hunze zullen geen slachtoffers vallen. Getroffenen zijn personen die zich in het overstromde gebied bevinden en schade zullen ondervinden hierdoor. Deze personen zullen mogelijk geëvacueerd moeten worden.

In de WaterSchadeSchatter wordt per overstromingsgebied de directe en indirecte schade in dat gebied berekend. Voor indirecte schades worden in de WaterSchadeSchatter gemiddelde waarden gebruikt (gemiddelde bedrijven en gemiddelde vitale infrastructuur) waardoor dit niet altijd juist is. Om die reden wordt in deze paragraaf uitgebreid onderzoek gedaan naar de indirecte schades per overstromingsgebied. De berekende indirecte schade in de WaterSchadeSchatter zal immers een onderschatting zijn indien er in een overstromingsgebied grote keteneffecten zijn of als er veel kwetsbare objecten aanwezig zijn. Bepaald is dat de indirecte schade door keteneffecten en kwetsbare effecten pas relevant is als de schade minimaal even groot is als de totale schade in een overstromingsgebied zoals bepaald is met de WaterSchadeSchatter.

Schades kunnen in verschillende gebieden optreden. Dit zegt direct iets over de grootte van het keteneffect. Zo kan er schade ontstaan:

- In de polder die overstroomt als gevolg van een doorbraak van de kering.
- In omliggende polders, door nadelige effecten van een doorbraak elders.
- Door de gevolgen van de overstroming aan het boezemsysteem.

In paragraaf 3.4.1 wordt de referentieschade bepaald met de WaterSchadeSchatter. In paragraaf 0 wordt een inschatting gemaakt van het aantal slachtoffers en getroffen. In paragraaf 3.4.3 wordt daarna op basis van de overstromingskaart gekeken welke kwetsbare objecten in het overstromingsgebied liggen en of de aanvullende schade leidt tot een vergroting van de schade. Paragraaf 3.4.4 gaat over de gevolgen in de naastgelegen polders en het effect op het boezemsysteem (keteneffecten).

3.4.1 Schade in overstroomd gebied (referentieschade)

3.4.1.1 *Uitgangspunten*

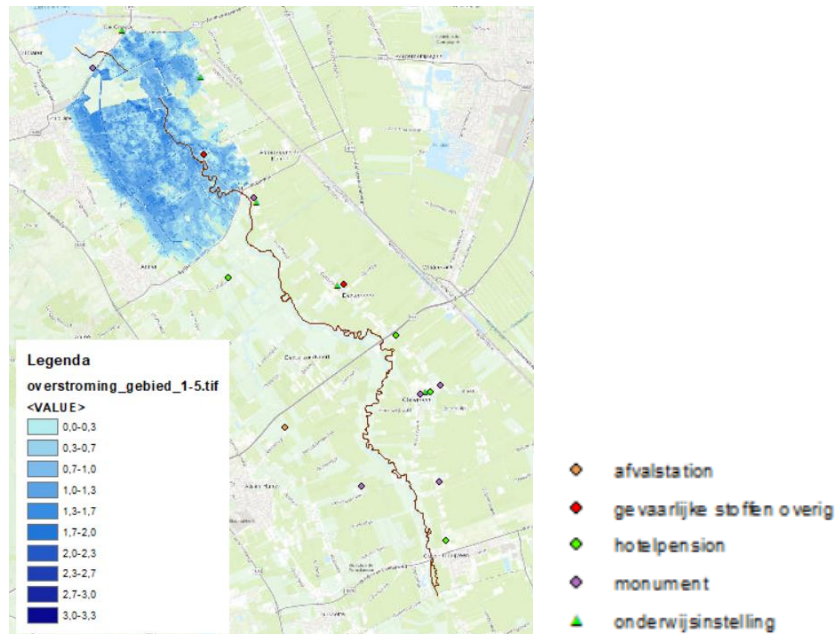
De schade per overstromingsgebied is bepaald met de WaterSchadeSchatter. Voor de invoer zijn er bepaalde uitgangspunten gebruikt:

- *Duur*
De aangenomen duur van de overstroming is veertien dagen (336 uur) voor overstromingsgebied 1 en 2. Tijdens hoogwater op zee zal er een maalstop zijn die tot twee weken kan duren waardoor het waterpeil zal stijgen.
Gezien het verval en denkend aan het hoge water in Limburg in juli 2021 door regenval, is er voor overstromingsgebieden 3 tot en met 5 een duur van zeven dagen (168 uur) aangenomen.
- *Hersteltijd*
De hersteltijd van wegen zal net als de standaardinvoer zes uur zijn. De hersteltijd van de (publieke) gebouwen is gezet op twee dagen in plaats van de standaardinvoer van één uur. Gebaseerd op de overstromingen in Limburg in juli 2021 is dit een meer realistische aanname bevonden.
- *Maand*
Voor overstromingsgebieden 1 en 2 is de grootste kans op een overstroming in december/januari tijdens het stormseizoen en hoogwater op zee.
Voor overstromingsgebieden 3 tot en met 5 is de grootste kans en grootste schade in juli vanwege de hoge neerslagverwachting en de grootste schade aan de gewassen ten opzichte van de hoge neerslagpieken in december.

In de volgende subparagrafen is de schade per overstromingsgebied weergegeven.

3.4.1.2 Overstromingsgebied 1

Het totale schadegebied van overstromingsgebied 1 is 1361,9 ha met een totaal schadebedrag van €1.994.323,-. In Tabel 3-1 staat hoe het totale schadegebied en bedrag is opgebouwd.



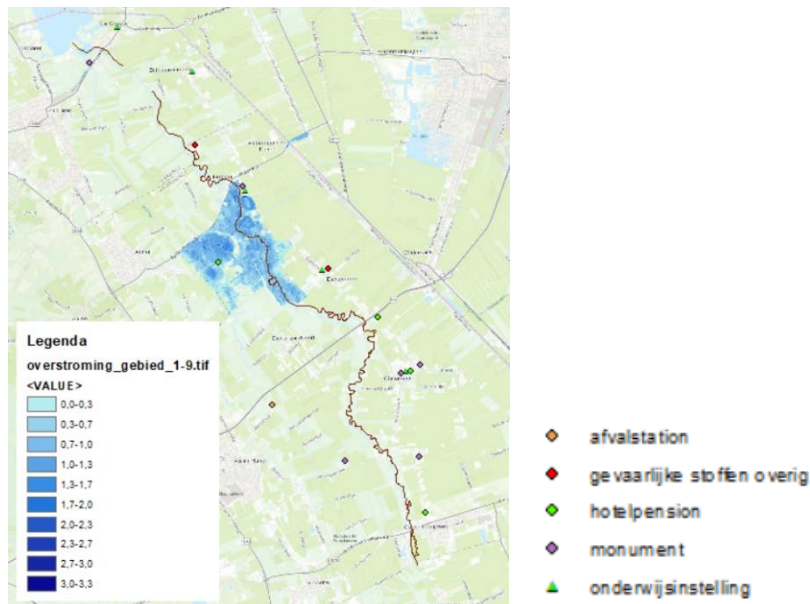
Figuur 3-8 Overstromingsgebied 1 bij waterstand in Hunze van NAP +1,5 m inclusief waterdiepten (m) en risicovolle objecten

Tabel 3-1: Schadebedragen Overstromingsgebied 1

Categorie	Oppervlakte met schade [ha]	Schade [€]
Woonfunctie	0,1	215.852
Industriefunctie	0,3	1.294.839
Bijeenkomstfunctie	0,0	29.080
Woongebied	9,5	7038
Lokale weg	8,3	6613
Overige wegdelen	8,3	6236
Agrarisch gras en veevoerders	101,6	26.284
Consumptieaardappelen	7,1	1802
Gerst	50,1	46.739
Haver	1,9	1804
Hennep	33,7	9709
Mais (korrel)	9,0	2324
Mais (snij)	77,7	16195
Pootaardappelen	15,2	3883
Suikerbieten	40,4	18.071
Tarwe	75,0	69.978
Voederbieten	0,5	204
Weidehooi	655,0	169.366
Zetmeelaardappelen	267,6	68.243
Voetpad	0,05	19
Fietspad	0,1	43

3.4.1.3 Overstromingsgebied 2

Het totale schadegebied van overstromingsgebied 2 is 486,1 ha met een totaal schadebedrag van €358.947,-. In Tabel 3-2 staat hoe het totale schadegebied en bedrag is opgebouwd.



Figuur 3-9 Overstromingsgebied 2 bij waterstand in Hunze van NAP +1,9 m inclusief waterdiepten (m) en risicovolle objecten

Tabel 3-2: Schadebedragen Overstromingsgebied 2

Categorie	Oppervlakte met schade [ha]	Schade [€]
Industriefunctie	0,2	140.076
Bijeenkomstfunctie	0,0	49.253
Woongebied	5,3	3979
Lokale weg	1,6	1166
Overige wegdelen	1,6	1170
Agrarisch gras en veevoerders	51,7	13369
Gerst	25,4	23.682
Haver	9,5	8840
Mais (snij)	20,5	4278
Pootaardappelen	7,6	1947
Suikerbieten	25,0	11.162
Tarwe	18,6	17.339
Voederbieten	1,0	462
Weidehooi	270,3	69.938
Zetmeelaardappelen	47,6	12.150
Fietspad	0,2	137

3.4.1.4 Overstromingsgebied 3

Het totale schadegebied van overstromingsgebied 3 is 251,1 ha met een totaal schadebedrag van €395.003,-. In Tabel 3-3 staat hoe het totale schadegebied en bedrag is opgebouwd (geen woonfunctie, bijeenkomstfunctie, industrie functie).



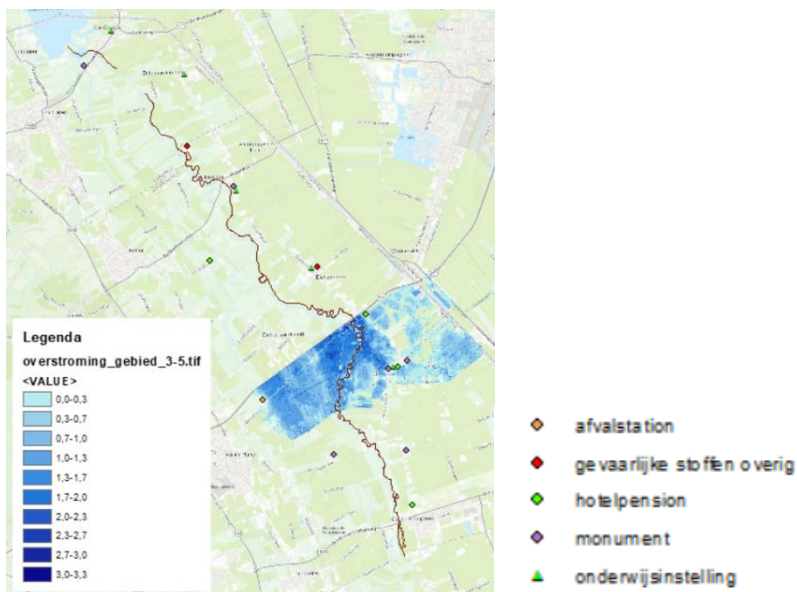
Figuur 3-10 Overstromingsgebied 3 bij waterstand in Hunze van NAP +2,2 m inclusief waterdiepten (m) en risicovolle objecten

Tabel 3-3: Schadebedragen Overstromingsgebied 3

Categorie	Oppervlakte met schade [ha]	Schade [€]
Woongebied	1,4	999
Lokale weg	0,6	403
Overige wegdelen	0,7	483
Agrarisch gras en veevoerders	22,6	13.379
Consumptieaardappelen	7,7	19.535
Gerst	28,9	26.472
Mais (snij)	8,1	16.941
Pootaardappelen	13,1	33.474
Rogge	1,2	1059
Suikerbieten	34,6	154.961
Tarwe	8,7	7958
Weidehooi	100,1	59.255
Zetmeelaardappelen	23,5	60.083

3.4.1.5 Overstromingsgebied 4

Het totale schadegebied van overstromingsgebied 4 is 1013,3 ha met een totaal schadebedrag van €4.619.109,-. In Tabel 3-4 staat hoe het totale schadegebied en bedrag is opgebouwd.



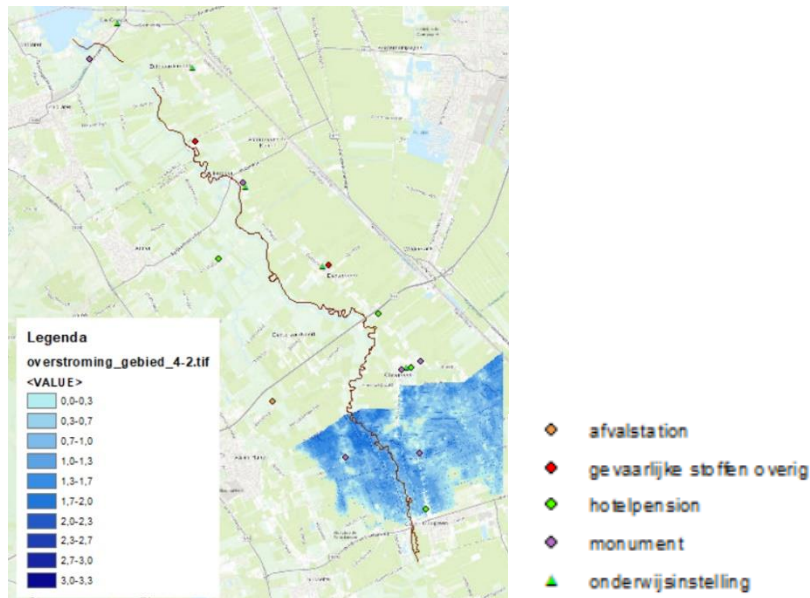
Figuur 3-11 Overstromingsgebied 4 bij waterstand in Hunze van NAP +3,5 m inclusief waterdiepten (m) en risicovolle objecten

Tabel 3-4: Schadebedragen Overstromingsbied 4

Categorie	Oppervlakte met schade [ha]	Schade [€]
Woonfunctie	0,8	1.975.724
Industriefunctie	0,1	7100
Kantoorfunctie	0,0	112.029
Winkelfunctie	0,1	244.082
Bijeenkomstfunctie	0,0	25.344
Woongebied	16,7	12.392
Bedrijventerrein	0,5	408
Dagrecreatief terrein	0,0	8
Verblijfsrecreatief terrein	0,1	137
Begraafplaats	0,0	27
Verkeerseiland	0,0	306.015
Lokale weg	7,8	5720
Overige wegdelen	6,2	4641
Spoor	0,0	67.864
Agrarisch gras en veevoeders	17,6	10.417
Bloembollen en sierteelt	1,5	41.388
Cichorei	9,9	19.586
Consumptieaardappelen	4,9	12.586
Gerst	64,0	58.589
Haver	3,8	3446
Hennep	4,3	8507
Mais (snij)	93,8	195.916
Pootaardappelen	17,3	44.263
Suikerbieten	115,7	517.427
Tarwe	56,4	51.576
Weidehooi	313,2	185.429
Zetmeelaardappelen	277,2	707.515
Fietspad	1,3	972

3.4.1.6 Overstromingsgebied 5

Het totale schadegebied van overstromingsgebied 5 is 1381,0 ha met een totaal schadebedrag van €5.358.051,-. In Tabel 3-5 staat hoe het totale schadegebied en bedrag is opgebouwd.



Figuur 3-12 Overstromingsgebied 5 bij waterstand in Hunze van NAP +4,2 m inclusief waterdiepten (m) en risicovolle objecten

Tabel 3-5: Schadebedragen Overstromingsgebied 5

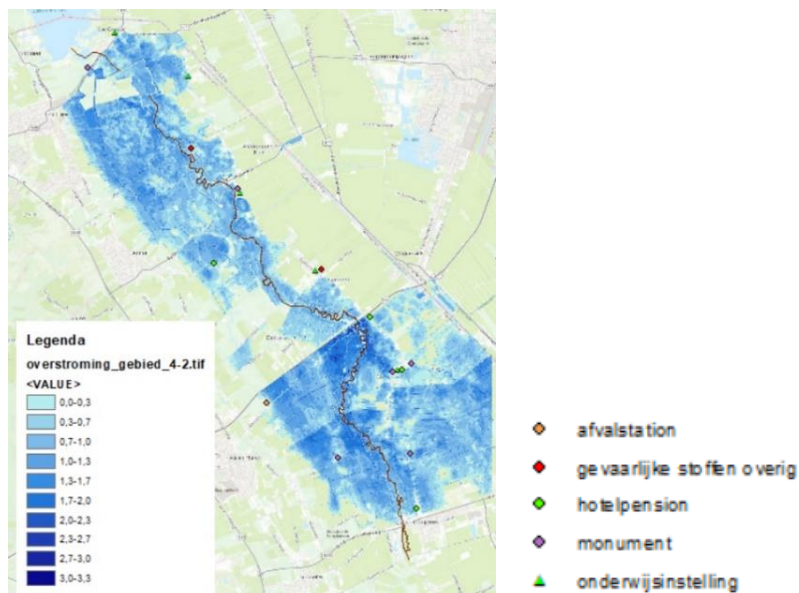
Categorie	Oppervlakte met schade [ha]	Schade [€]
Woonfunctie	0,2	538.997
Industriefunctie	0,4	1.322.279
Kas	0,1	37.421
Woongebied	27,8	20.731
Bedrijventerrein	1,0	705
Lokale weg	7,2	5313
Overige wegdelen	5,4	3906
Agrarisch gras en veevoeders	10,0	5944
Blauwe bessen	15,9	357.087
Bloembollen	11,7	333.669
Boom en heesterkweek	0,0	1327
Frambozen	0,0	419
Fruitteelt	0,3	5847
Gerst	186,3	170.495
Hennep	1,6	3112
Kersen	0,1	1128
Kerstbomen	4,2	174.363
Mais (snij)	101,8	212.515
Pootaardappelen	36,0	91.875
Pruimen	0,0	486
Rabarber	1,7	3306
Rode bessen	0,1	2324
Suikerbieten	159,0	711.380
Tarwe	39,7	36.348

Categorie	Oppervlakte met schade [ha]	Schade [€]
Voederbieten	4,1	18.556
Weidehooi	340,4	201.541
Zetmeelaardappelen	425,9	1.086.879
Fietspad	0,1	96

3.4.1.7 Gecombineerde schade

Indien overloop plaats zal vinden in alle vijf de overstromingsgebieden zal dit zorgen voor een totaal schadebedrag van €12.725.433,-. Overstromingsgebieden 4 en 5 dragen aan dit totaal bedrag het meeste bij.

Overigens is het zeer onwaarschijnlijk dat deze volledige overstroming optreedt. De mogelijke overstromingen in gebied 1 en 2 hebben een andere oorzaak (namelijk hoogwater op het Zuidlaardermeer) dan overstromingsgebied 3, 4 en 5 (regen en kwel gedomineerd), waarbij het onwaarschijnlijk is dat dit tegelijk optreedt.



Figuur 3-13 Gecombineerde kaart van alle overstromingsgebieden inclusief waterdiepte (m) en de risicovolle objecten

3.4.2 Slachtoffers en getroffen

Gezien de locaties van woningen, het debiet van de Hunze, de overstromingsdiepte en de kanttekening dat dit een overschatting is wordt er gesteld dat er geen slachtoffers zullen vallen bij een overstroming.

Het aantal getroffen in het overstromd gebied wordt minimaal gelijkgesteld aan het aantal inwoners. Het (gecombineerde) overstromde gebied bestaat uit de volgende dorpen:

- De Groeve: 475 inwoners (1 januari 2020);
- Zuidlaarderveen: 325 inwoners (1 januari 2020);
- Oud Annerveen: 135 inwoners (1 januari 2020);
- Spijkerboor: 25 inwoners (1 januari 2020);
- Nieuw Annerveen: 110 inwoners (1 januari 2020);
- Eexterveen: 475 inwoners (1 januari 2020);
- Eextertzandvoort: 135 inwoners (1 januari 2020);
- Gieterzandvoort: 45 inwoners (niet officieel, hoort bij dorp Gieten);
- Gieterveen: 980 inwoners (1 januari 2020).

Op basis van deze getallen telt het overstromde gebied in totaal circa 2705 inwoners die zullen worden getroffen indien de waterkering langs de Hunze op meerdere locaties doorbreekt of overloopt.

Het aantal getroffen voor de verschillende overstromingsgebieden zijn circa:

- overstromingsgebied 1: 947 inwoners (De Groeve, Zuidlaarderveen, Oud Annerveen en helft Spijkerboor);
- overstromingsgebied 2: 598 inwoners (helft Spijkerboor, Nieuw Annerveen en Eexterveen);
- overstromingsgebied 3: 135 inwoners (Eextertzandvoort);
- overstromingsgebied 4: 535 inwoners (Gieterzandvoort en helft Gieterveen);
- overstromingsgebied 5: 490 inwoners (helft Gieterveen).

3.4.3 Kwetsbare objecten

Als kwetsbare objecten onderscheiden we:

- kwetsbare objecten zoals ziekenhuizen, zorginstellingen en scholen;
- rijksmonumenten en cultureel erfgoed;
- risicolocaties voor milieu (locaties waar inundatie kan leiden tot grote milieuschade zoals opslaglocaties voor schadelijke stoffen);
- volgens de Kaderrichtlijn water (KRW) beschermde gebieden (drinkwaterwinlocaties, zwemwaterlocaties en Natura2000 gebieden).

3.4.3.1 Kwetsbare objecten

In het gebied liggen de volgende kwetsbare objecten die te maken krijgen met wateroverlast (op basis van risicokaart.nl).

Tabel 3-6: Kwetsbare objecten

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	2 onderwijsinstellingen		
2	1 hotelpension		
3	-		
4	1 onderwijsinstelling 2 hotelpensions		
5	1 hotelpension		

In het referentiebedrag, gehaald uit de WaterSchadeSchatter, is er in geen van de gebieden een schadebedrag bepaald voor onderwijsinstellingen of logies terwijl zich in het gebied totaal 3 onderwijsinstellingen en 4 hotelpensions bevinden. Dit betekent een onderschatting van de schade in de gebieden 1 en 4.

Daartegenover heeft de WaterSchadeSchatter wel een bedrag berekend in overstromingsgebied 1, 2 en 4 voor gebouwen met een bijeenkomstfunctie, die niet zichtbaar werden in de risicokaart.

- overstromingsgebied 1: €29.080,-;
- overstromingsgebied 2: €49.253,-;
- overstromingsgebied 4: €25.344,-.

Onder bijeenkomstfunctie wordt verstaan: het samenkomen van personen voor kunst, cultuur, godsdienst, communicatie, kinderopvang, het verstrekken van consumpties voor het gebruik ter plaatse of het aanschouwen van sport.

3.4.3.2 Rijksmonumenten en cultureel erfgoed

Op basis van de laag rijksmonumentpunten in het nationaal georegister en in de risicokaart kan worden geconcludeerd dat er zes rijksmonumenten in het gebied liggen.

Tabel 3-7: Rijksmonumenten

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	1 monumentaal pand	industrie- en poldermolen	
2	1 monumentaal pand	boerderij	
3	-		
4	2 monumentale panden	kerk en industrie- en poldermolen	
5	2 monumentale panden	boerderijen	

De bedragen die in de WaterSchadeSchatter zijn berekend voor gebouwen met een bijeenkomstfunctie kunnen mogelijk geschaard worden onder de monumentale panden in het gebied.

3.4.3.3 Risicolocaties voor milieu

Gevaarlijke stoffen

Er is één object in het stroomgebied dat onder ongevallen met 'gevaarlijke stoffen, overig' (risicokaart.nl) valt (in de kaart gemarkeerd als rode cirkels). Dit is een gaswinninglocatie van de NAM. Deze locatie wordt echter medio 2021 gesloten en vormt, nadat de infrastructuur is weggehaald, geen risico meer voor het milieu ([NAM start sluiting Annerveen gasveld | NAM](#)).

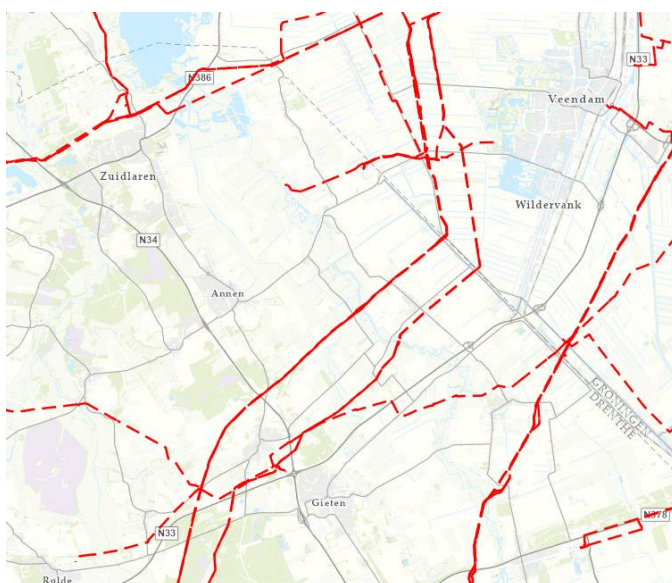
Tabel 3-8: Risicolocaties voor milieu

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	1 gaswinninglocatie & buisleiding	risico tot infrastructuur is weggehaald (2022)	
	2 buisleidingen		
2	1 buisleiding		
3	1 buisleiding		
4	1 afvalbrengrstation		
	1 buisleiding		
5	1 buisleiding		

In totaal liggen er zeven risicovolle buisleidingen die de Hunze oversteken of er dicht tegen aan liggen en met een overstroming onder water komen te liggen. Hiervan zal één leiding, die richting de NAM-locatie aan de oever van de Hunze loopt, medio 2021 worden afgesloten van het netwerk. Bij risicovolle buisleidingen kun je denken aan (hogedruk) transport van aardgas, olie, benzine, kerosine, chemische producten en industriële gassen.

De grootste kans op een risicovolle gebeurtenis is bij ontgravingen. Indien er geen lekkages in de leidingen zijn zal het niet uitmaken als de buizen meer waterdruk door het hoogwater krijgen dan normaliter. De leidingen zijn hierop berekend. De kans op een lekkage kan wel toenemen doordat door de hogere waterdruk leidingen kunnen opdrijven waardoor er een extra kracht op de vastverbindingen komt.

Indien er een doorbraak van de kering plaatsvindt zal bij het (provisorisch) herstellen ervan hier wel rekening mee moeten worden gehouden, gezien de druk op de leiding zal toenemen en er zettingsverschillen zouden kunnen ontstaan.



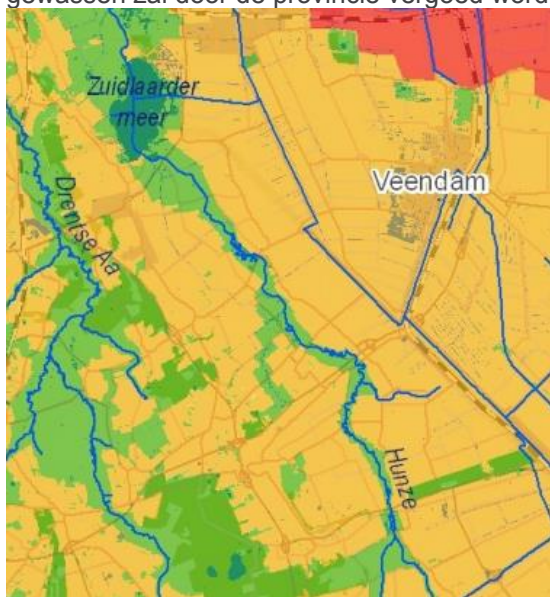
Figuur 3-14 Transport gevaarlijke stoffen door buisleidingen (risicokaart.nl)

Ten oosten van Gieten bevindt zich daarnaast een afvalbrenngstation, die onder water kan komen te staan (zie figuur 3-13). Dit kan vervuiling veroorzaken.

Bevers

Bevers kunnen holen graven in de kering, wat leidt tot zwakke plekken in de kering. Een bever graaft onder water een hol naar boven toe, tot boven de grondwaterstand. Indien het hoogwater is, kan de bever het bestaande hol verder omhoog gaan graven, dieper de kering in en op zoek naar een droge plek. Als hopen onopgemerkt blijven kan dit bij hoogwater tot bezwijken leiden. Bevervangers zijn daarom binnen het pilotgebied aan het werk om hopen op te sporen en waar nodig te herstellen.

Het leefgebied van de bever zelf zal niet beschadigd raken door een overstroming. Hij zal de burcht achterlaten en zich verplaatsen naar droge grond. Het zou kunnen dat met een doorbraak de bever zich (definitief) verplaatst richting het overstroomde achterland. In dat geval kan de bever terechtkomen in de oranje gemarkeerde gebieden, zoals zichtbaar in Figuur 3-15. Deze gebieden bestaan voor een groot deel uit landbouwgebied. De bever kan zich hier vestigen, zolang zijn gedrag geen negatief effect heeft op de omgeving. Schade aan gewassen zal door de provincie vergoed worden [15].



Figuur 3-15 Beverbeheerkaart [15]

3.4.3.4 Beschermde gebieden (drinkwaterwinning, zwemlocaties en Natura 2000)

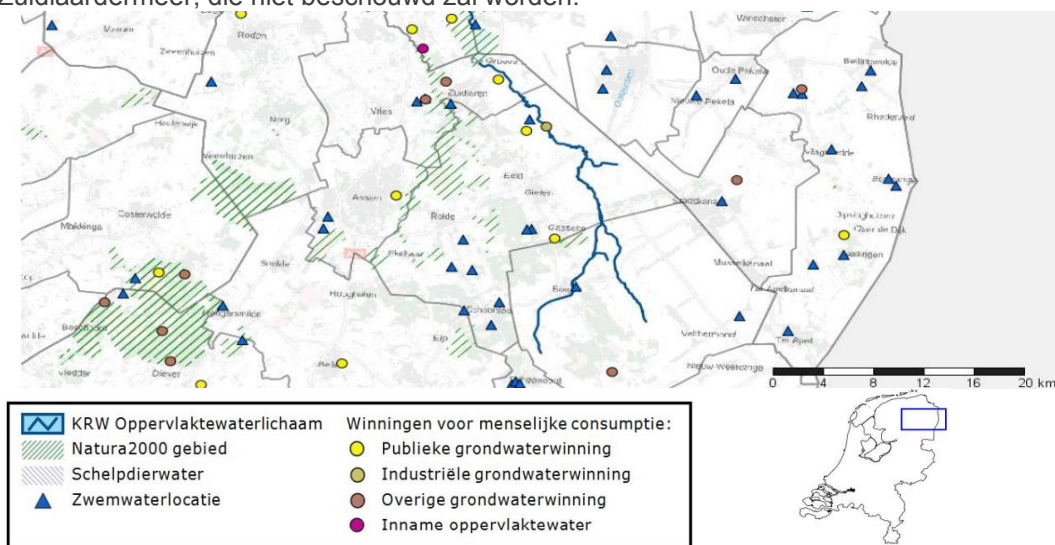
In het stroomgebied van de Hunze liggen twee drinkwaterwingebieden (Annen-Breevenen en Groeve) en een strategische drinkwaterwinning (Kastelenakkers). Het vergunde onttrekkingsdebiet van de winning Annen-Breevenen is 3,5 miljoen m³/jaar. Van De Groeve is dit 10 miljoen m³/jaar.

Tabel 3-9: Beschermde gebieden

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	Drinkwaterwingebied Groeve Strategisch wingebied Kastelenakkers Zuidlaarderplas Natura 2000		

2	Drinkwaterwingebied Annen
3	-
4	-
5	-

Het Zuidlaardermeer waar de rivier in uitmond is een Natura2000-gebied. Daarnaast bevindt zich in het stroomgebied van de Hunze één zwemlocatie die bij een overstroming getroffen kan worden. De andere zwemlocatie bevindt zich in het Zuidlaardermeer, die niet beschouwd zal worden.



Figuur 3-16: Beschermde gebieden Hunze en Aa's [5]

3.4.4 Keteneffecten

Met keteneffecten bedoelen we de indirecte gevolgen die een doorbraak heeft op de omliggende polders (bijvoorbeeld geen watertoevoer benedenstrooms of maalstop waardoor grondwaterpeil oploopt in polder) en het boezemsysteem (schade aan kering zelf).

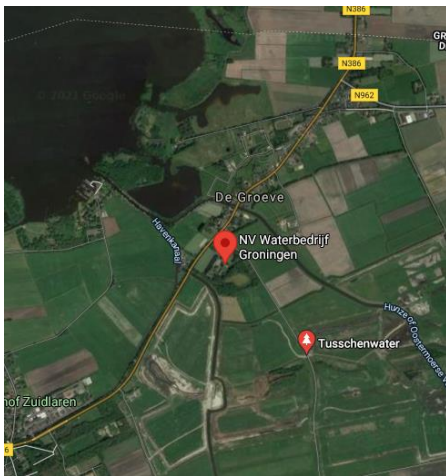
3.4.4.1 Vitale infrastructuur

In Nederland is door de Nationale Coördinator Terrorisme en Veiligheid een lijst processen als vitaal geïdentificeerd. In het overstromingsgebied zijn twee soorten vitale infrastructuur aanwezig.

Tabel 3-10: Vitale infrastructuur

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	Drinkwatervoorziening	Geen gevolgen in overstromde gebieden	
	Provinciale weg N386		
	Provinciale weg N962		
2	-		
3	-		
4	Provinciale weg N385		
	Provinciale weg N33		
5	Provinciale weg N385		

Ten eerste de drinkwatervoorziening. Net ten zuiden van het Zuidlaardermeer bevindt zich het NV Waterbedrijf Groningen waarvandaan het drinkwater getransporteerd wordt naar Groningen. In het overstromingsgebied komt deze locatie mogelijk 1 m onder water te staan (zie overigens wel de eerder genoemde kanttekeningen bij het gehanteerde overstromingsmodel, wat voor een overschatting van de gemodelleerde overstroming heeft gezorgd). Onbekend is of het Waterbedrijf Groningen dan nog veilig door kan gaan met het transporteren van drinkwater. Dit is een vitaal proces van categorie A. Hierbij hebben categorie A vitale processen grotere gevolgen bij uitval dan categorie B vitale processen. In het overstroomde gebied kan dit tot een verstoring leiden van de grondwaterpompen, maar niet van de drinkwatervoorziening.



Figuur 3-17 Locatie NV Waterbedrijf Groningen net ten zuiden van Zuidlaardermeer

Ten tweede hebben we het proces 'Vervoer over (hoofd)wegennet' van categorie B. Belangrijke wegen die mogelijk overstroomd zijn van noord naar zuid: de N386, N962, N385 en N33. Door een sluiting van deze wegen zal het verkeer dat van het oosten naar het westen moet of andersom in het zuiden via de N387 moeten omrijden of ten noorden van het Zuidlaardermeer, via de N860. Dit zal circa een half uur extra reistijd opleveren. Evacuatie zal moeten plaatsvinden richting het achterland, dus naar het oosten of westen ten opzichte van de Hunze.

In Annerveen bevindt zich een NAM locatie voor gaswinning uit het Annerveen gasveld. Dit gasveld wordt medio 2021 afgesloten en de infrastructuur zal worden opgeruimd. Dit zal dus geen invloed hebben op de vitale processen.

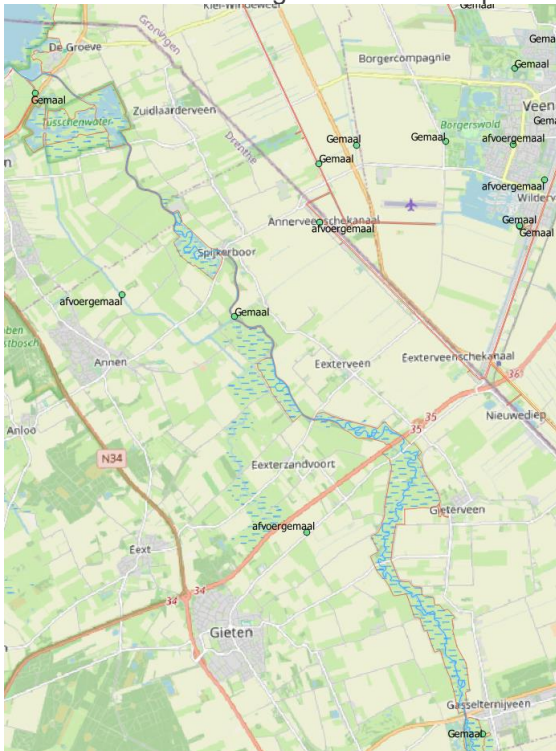
3.4.4.2 Indirecte gevolgen na maalstop

Indien een polder het (regen)water niet meer kwijt kan door een maalstop zal het grondwaterpeil stijgen, wat gevolgen heeft voor de aanwezige gewassen in het gebied.

Tabel 3-11: Gevolgen van maalstop

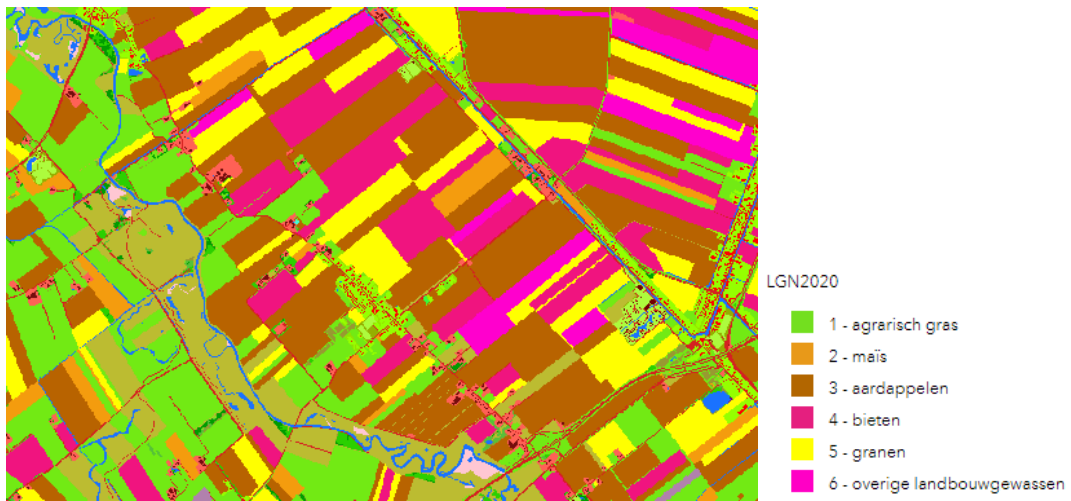
Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	-		
2	Ondergelopen gebied door maalstop Annerveense Mond i.c.m. extreme regenval	Indien Hunze op rand van overlopen staat	€1.411.025 (extreem: €2.822.050)
3	-		
4	-		

Langs de Hunze bevindt zich één afvoergemaal: gemaal De Bulten in Nieuw-Annerveen. Dit gemaal verbindt de Annerveense Mond met de Hunze. Het bemaalt het oostelijke Hunze-gebied met twee verticale schroefpompen met een totale capaciteit van 140 m³/minuut. Enkel regenval kan het oostelijke Hunze-gebied doen laten overstromen, omdat er geen andere waterstroom is die het gebied vol doet lopen.



Figuur 3-18 Gemalen in omgeving van de Hunze

Ten noorden van de Annerveense mond zit nog een afvoergemaal dat het regenwater kan afvoeren naar het Annerveense kanaal (ten oosten van de Hunze). Ingeschat wordt dat het gebied ten zuiden van de Annerveense mond tot de N34 wel problemen zal krijgen door de maalstop. Dit gebied is totaal circa 2,7 km bij 4,0 km (1.080 ha).



Figuur 3-19 Uitsnede van gebied tussen Annerveense Mond en N33 uit Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN-viewer)

Indien bij een extreme situatie het gebied onder water komt te staan door een maalstop zullen de kosten gelijk zijn aan de schades uit de WaterSchadeSchatter voor de verschillende gewassen (indien wordt uitgegaan van dezelfde overstromingsduur). In de tabel hieronder is een schatting gemaakt van het aantal ha van een gewas in het gebied met daarachter de gemiddelde kosten per gewas gehaald uit de WaterSchadeSchatter.

Tabel 3-12: Gevolgen na maalstop Annerveensche Mond

Gewas	Percentage [%]	Aantal ha	Gemiddelde kosten [€]
Agrarisch gras	10	108	118.152
Mais	2	21,6	45.100
Aardappelen	45	432	1.102.464
Bieten	20	216	966.168
Granen	15	162	273.942
Overig	8	86,4	316.224

Dit kan enkel bij een extreme situatie van regenval gebeuren. Het wordt geschat dat de werkelijke kosten circa 50% van dit totale (extreme) schadebedrag zijn.

3.4.4.3 Indirecte gevolgen uitval vitale infrastructuur

Door uitval van (de leiding van) het NV Waterbedrijf Groningen (die zich bevindt in overstromingsgebied 1) komt in het meest extreme geval een gedeelte van Groningen zonder drinkwater te zitten. De locatie in het overstromingsgebied is een productielocatie waar ongeveer 10 miljoen kubieke drinkwater per jaar geproduceerd wordt door filtering van het grondwater. Dit filterproces kan verstoord worden als de locatie onder water komt te staan. Uit ervaring blijkt daarnaast dat door de contaminatie van het grondwater na een overstroming de drinkwaterproductie het langst nodig heeft voordat de productie weer wordt heropgestart.

Tabel 3-13: Uitval vitale infrastructuur

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1 - Extern	Drinkwatervoorziening Groningen in gevaar	Per dag zal circa 27.400 m ³ drinkwater niet naar Groningen getransporteerd kunnen worden	

3.4.4.4 Herstelkosten kering en boezemland

Door overloop kunnen de kruin van de kering en het binnentalud door erosie beschadigen. Aangezien de kering langs de Hunze geen steil binnentalud heeft zorgt de snelheid van het water over de kering niet voor veel erosie van het binnentalud. Aangenomen is dat circa 0,1 m³ grondlichaam per meter kering zal eroderen en dat het binnentalud met de grasmat opnieuw zal moeten worden gelegd en afgewerkt. We gaan voor deze grasmat ervan uit dat op het binnentalud circa 2 m² per meter breedte zal beschadigen door het overlopende water. Overloop zal voornamelijk optreden bij de laagste kruinhoogtes, daarom wordt uitgegaan van schade op 10% van de totale lengte. De kostenraming van de verhoogde kadenorm [Kostenraming verhoogde kadenormen Eemskanaal-Dollardboezem (EKDB) [11]] is gebruikt voor het doorvertalen van de getallen naar kosten:

- klei verwerken in binnentalud: € 19,54 per m³;
- afwerken binnentalud: € 0,52 per m².

Deze kosten zijn exclusief de indirecte bouwkosten, engineeringkosten en overige bijkomende kosten.

Tabel 3-14: Herstelkosten kering

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	Schade kering door overloop	675 m per zijde	€ 4.042
2	Schade kering door overloop	465 m per zijde	€ 2.784
3	Schade kering door overloop	220 m per zijde	€ 1.317
4	Schade kering door overloop	377,5 m per zijde	€ 2.261
5	Schade kering door overloop	442,5 m per zijde	€ 2.650

Opmerking

- Deze kosten zijn mogelijk te hoog ingeschat. Er is weinig golfslag op de Hunze, waardoor er weinig golfslag zal zijn. De kosten om het te herstellen zullen daarom lager uitvallen dan langs het Eemskanaal.

3.4.4.5 Kabels en leidingen in/langs kering

Het is onbekend of er kabels en/of leidingen door of langs de kering lopen. Bij overloop zal er geen schade aan deze kabels en leidingen ontstaan. Bij een afschuiving aan de buiten- of binnenzijde kan er wel schade optreden. Aangezien er geen informatie bekend is over de ligging van de kabels en leidingen wordt er geen schadebedrag toegekend.

3.4.4.6 Indirecte gevolgen daling waterstand

Een snelle val van hoogwater kan leiden tot instabiliteit van het buitentalud. Het buitentalud van de keringen langs de Hunze is in eerdere toetsronden echter niet beoordeeld. Het is daarom lastig om te zeggen of de stabiliteit van het buitentalud een mogelijke val aan kan of niet.

Wat wel in de eerdere toetsronden is gezegd omtrent stabiliteit van het binnentalud is dat afschuiving niet snel zal leiden tot een overstroming, aangezien er veel restbreedte aanwezig is. Voor een afschuiving van het buitentalud is deze restbreedte dan ook voldoende om ervoor te zorgen dat er geen grote consequenties zijn. Aangenomen wordt dat er wel beschadigingen zullen optreden aan de waterkeringen vanwege het steile buitentalud, maar dat er geen doorbraken in andere dijkvakken zullen plaatsvinden.

Geschat wordt dat in de omliggende dijkvakken er overal een afschuiving zal zijn met een breedte van circa 5 m. Hierbij zal totaal 15 m³ en een oppervlakte van 15 m² grond afschuiven. Aangenomen wordt dat de kosten evenredig zijn aan de kosten voor het binnentalud voor het verwerken van de klei en de afwerking.

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	Schade door afschuiving buitentalud	15 m ³ afschuiving	€300
2	Schade door afschuiving buitentalud	15 m ³ afschuiving	€300
3	Schade door afschuiving buitentalud	15 m ³ afschuiving	€300
4	Schade door afschuiving buitentalud	15 m ³ afschuiving	€300
5	Schade door afschuiving buitentalud	15 m ³ afschuiving	€300

3.4.4.7 Gebruiksfuncties

Door een doorbraak kunnen de gebruiksfuncties van de boezem in gevaar komen, zoals scheepvaart of de aan- en afvoer van water.

De Hunze heeft een belangrijke aan- en afvoerfunctie van water. In de kaart met de aanvoergebieden van waterschap Hunze en Aa's wordt duidelijk dat circa 1/3 van de polders langs de Hunze afhankelijk is van het water in de Hunze (bruin). Dit is voornamelijk bovenstrooms, in het zuidwesten van het gebied. Indien een doorbraak in de gebieden 1, 2 of 3 plaatsvindt is dit voor de polders die gevoed worden door het Hunzewater niet van belang aangezien deze zich stroomopwaarts bevinden. Bij een doorbraak ten zuiden van de N33 heeft het bruin gearceerde gebied ten noorden van de N33 mogelijk een watertekort waardoor gewassen zullen beschadigen.

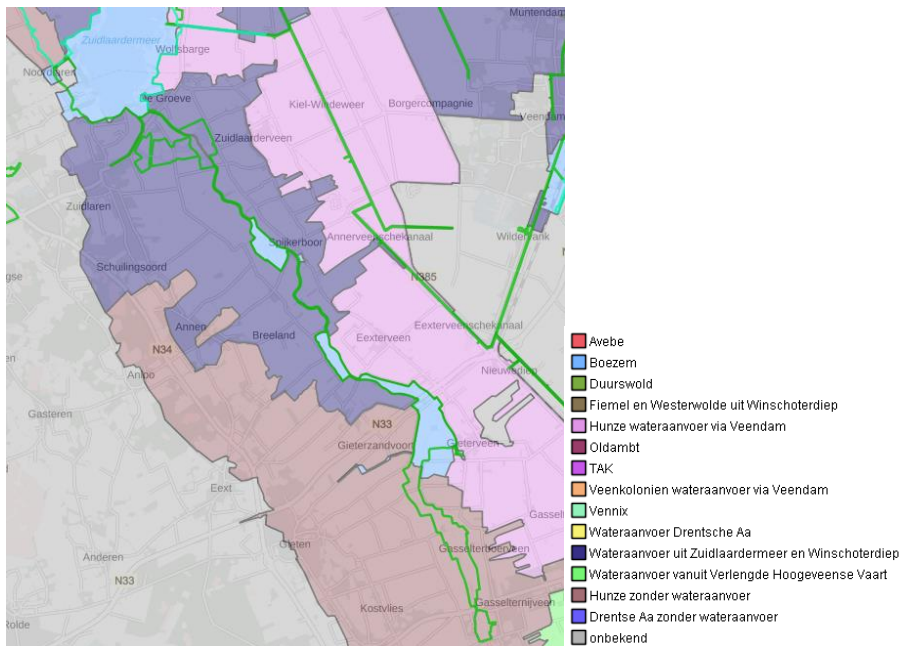
Het schadegebied is in gebied 2 circa 800 ha, in gebied 3 600 ha en in gebied 4 1.000 ha. Geschat wordt dat het schadebedrag door droogte in vergelijking tot overstroming kleiner is. Uitgegaan wordt van een gemiddeld bedrag van 800 euro per ha.

Opmerking

- Overigens is het de vraag of de combinatie van watertekort én hoogwater wel tegelijk kan voorkomen. Overstroming door hoogwater zal veroorzaakt zijn door hevige regenval. Dit betekent ook dat de rest van het gebied voldoende neerslag heeft gekregen (tenzij het heel lokaal is gevallen).
- Voor de lagere overstromingsgebieden geldt dat een overstroming voorkomt door een verzadigd boezemsysteem in combinatie met niet kunnen spuien tijdens springtij. Dit komt voor in de wintermaanden, waarbij het groeiseizoen van de gewassen al is afgelopen.

Tabel 3-15: Schade door watertekort

Gebied	Onderdeel	Toelichting	Bedrag
1	-		
2	Schade door watertekort	Bij doorbraak in gebied 4/5	€640.000
3	Schade door watertekort	Bij doorbraak in gebied 4/5	€480.000
4	Schade door watertekort	Bij doorbraak in gebied 5	€800.000
5	-		

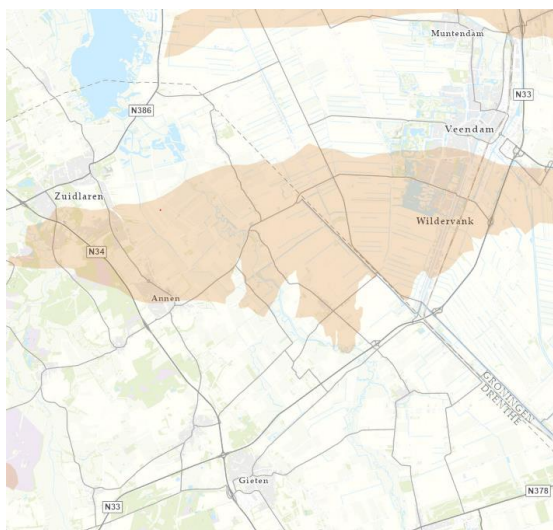


Figuur 3-20: Wateraanvoer gebieden Hunze & Aa's

Qua scheepvaart is op de Hunze enkel kanovaren mogelijk. Een stremming van de Hunze door een doorbraak treft daarom weinig mensen. Enkel de toerismebranche in het gebied zal geraakt worden.

3.4.5 Overig

Circa 25% van de keringen langs de Hunze liggen in het risicogebied voor aardbevingen (risicokaart.nl). De kans op schade door een aardbeving is dus mogelijk. De kans op een doorbraak is echter klein aangezien de bevingen van een korte duur en sterkte zijn. Het karakter van de beving is niet zoals een klassieke tektonische beving die amplitudes in meerdere richtingen kent. Hier gaat het doorgaans over een ééndimensionale en vooral eenmalige golf.



Figuur 3-21: In oranje de risicogebieden voor aardbevingen (risicokaart.nl)

Aannames schadebepaling

- De grootte van de overstromingsgebieden is aangenomen zoals deze is bepaald in ArcMap met de maatgevende waterstand in dat dijkvak en oneindig debiet.
- Schades door overloop en instabiliteit van het buitentalud zijn ingeschat aan de hand van foto's en verhalen van oude gebeurtenissen.

Kanttekeningen gehanteerde schadebepaling

- De schades zijn overschat met het huidige overstromingsmodel, doordat is aangenomen dat een overstromingsgebied zich compleet vult tot de maatgevende waterstand.
- De schades zijn bepaald voor een maatgevende waterstand van 1/100 jaar horend bij de huidige IPO-klasse III en niet voor andere terugkeertijden en waterstanden, aangezien deze waterstandstatistiek niet beschikbaar is.

3.5 Afgeleide IPO-normering

De IPO-klasse van de waterkering is bepaald per overstromingsgebied. Het is hierbij gebaseerd op basis van de directe schades en op basis van de directe én indirecte schades.

Kanttekening hierbij is dat er geen onderscheid is gemaakt in stormen met verschillende terugkeertijden. De schades zijn bepaald bij een maatgevende waterstand van 1/100 jaar horend bij de huidige IPO-klasse III.

Klasse	Veiligheidsnorm	Gevolgschade criteria voor de klasse [mln. Euro]	Frequentie van de maatgevende rivierwaterstand voor bepaling gevolgschade
I	1/10	< 8	1/10
II	1/30	8 - 25	1/30
III	1/100	25 - 80	1/100
IV	1/300	80 - 250	1/300
V	1/1.000	>250	1/1.000

Figuur 3-22 Normering voor keringen langs regionale rivieren

Het schadebedrag uit de WaterSchadeSchatter en de bijbehorende IPO-klasse uit Figuur 3-22 is voor de verschillende overstromingsgebieden weergegeven in Tabel 3-16.

Tabel 3-16: Schadebedragen WaterSchadeSchatter

Gebied	Onderdeel	Bedrag	IPO-klasse
1	WaterSchadeSchatter	€1.994.323	I
2	WaterSchadeSchatter	€358.947	I
3	WaterSchadeSchatter	€395.003	I
4	WaterSchadeSchatter	€4.619.109	I
5	WaterSchadeSchatter	€5.358.051	I

De directe en indirecte schades zijn uitvoerig beschreven in paragraaf 3.4. Hieruit volgt de opsomming van schade-onderdelen per overstromingsgebied in Tabel 3-17. Ondanks dat niet aan ieder onderdeel een bedrag kan worden gegeven wordt geschat dat het totaalbedrag onder de € 8 miljoen zal blijven, mede doordat met het huidige overstromingsmodel de schades al overschat worden. Dit betekent dat de IPO-klasse ook inclusief alle indirecte schades klasse I zal blijven voor alle dijkvakken.

Tabel 3-17: Indirecte schades en bijbehorende IPO-klasse

Gebied	Onderdeel	Bedrag	IPO-klasse
1	947 getroffen		I
	2 onderwijsinstellingen		
	1 monumentaal pand		
	1 gaswinninglocatie en buisleiding		
	2 buisleidingen		
	drinkwaterwingebied Groeve		
	strategisch wingebied		
	Kastelenakkers		
	Zuidlaarderplas Natura2000		
	drinkwatervoorziening		
	provinciale weg N386		
	provinciale weg N962		
	schade kering door overloop	€ 40.419	
	schade door afschuiving	€ 300	
buitentalud			
minder drinkwater Groningen			
2	598 getroffen		I
	1 hotelpension		
	1 monumentaal pand		
	1 buisleiding		
	drinkwaterwingebied Annen		
	ondergelopen door maalstop	€ 1.411.025	
	schade kering door overloop	€ 27.844	
schade door afschuiving	€ 300		
buitentalud			
schade door watertekort	€ 640.000		
3	135 getroffen		I
	1 buisleiding		
	schade kering door overloop	€ 13.174	
	schade door afschuiving	€ 300	
buitentalud			
schade door watertekort	€ 480.000		
4	535 getroffen		I
	1 onderwijsinstelling		
	2 monumentale panden		
	1 afvalbrengrstation		
	1 buisleiding		
	provinciale weg N385		
	provinciale weg N33		
	schade kering door overloop	€ 22.605	
schade door afschuiving	€ 300		
buitentalud			
schade door watertekort	€ 800.000		

Gebied	Onderdeel	Bedrag	IPO-klasse
5	490 getroffen		
	2 hotelpensions		
	1 hotelpension		
	2 monumentale panden		
	1 buisleiding		
	provinciale weg N385		
	schade kering door overloop	€ 26.497	
	schade door afschuiving	€ 300	
	buitentalud		

4 Maatregelen watersysteem

4.1 Scope

Dit hoofdstuk gaat in op het volgende:

- Doel: werkwijze opstellen voor het meenemen van gevolgbeperkende maatregelen in de normering en het bepalen van de vereiste betrouwbaarheid van deze maatregelen.
- Te beschouwen: invloed van maatregelen op de gevolgen en de normering, eisen aan betrouwbaarheid van de maatregelen en de consequenties hiervan, eventuele nadelige invloed van deze maatregelen.

4.2 Bestaande maatregelen

Afgelopen jaren hebben al meerdere ingrepen plaatsgevonden aan het watersysteem van de Hunze. Binnen de huidige kades is de rivier in meanderende staat teruggebracht en zijn er natuurgebieden gerealiseerd. Hierdoor is er meer ruimte voor waterberging binnen de kades.

De Onner- en Oostpolder ten westen van het Zuidlaardermeer zijn ingericht als waterwin- en bergingsgebied, gecombineerd met natuurontwikkeling. In de winter wordt water ingelaten, zodat het in de warmere maanden geschikt is voor moerasvogels. Als de polders dienst doen als bergingsgebied in de Eemskanaalboezem, kan dit stijging van het peil in het Zuidlaardermeer tijdens hoogwater op zee verminderen. In die zin kunnen de polders hun werking hebben tegen overstroming van de lager gelegen delen van de Hunze.

4.3 Mogelijke maatregelen

4.3.1 Compartimenteren rivier

In het geval van een boezem kan compartimenteren voorkomen dat bij een kadebreuk de hele boezem leegloopt. Bij het plaatsen van een compartimentering bovenstrooms van een kadebreuk voorkomt dit enerzijds schade door droogvallen van de boezem (schade aan infrastructuur) en anderzijds vermindert het de toevoer van water en daarmee schade in het overstroomde gebied.

Het verschil tussen een boezem en een rivier, is dat een rivier een blijvende toevoer van water heeft. Compartimenteren van de rivier zal leiden tot verder stijgende waterstanden bovenstrooms van de compartimentering. Compartimentering is alleen kansrijk, als dit water ergens anders in het gebied geborgen kan worden. Het water zal dan van een schadegevoelig gebied naar een minder schadegevoelig én bovenstrooms gelegen gebied geleid moeten worden.

De meeste economische schade kan optreden in overstromingsgebieden 4 en 5. Dit zijn al de meest zuidelijk gelegen gebieden, het inrichten van waterbergingsgebieden verder naar het zuiden (bovenstrooms) is daarom niet mogelijk. Compartimenteren van de rivier wordt daarom niet kansrijk geacht.

4.3.2 Afleiden naar andere wateren

Ter hoogte van Nieuw Annerveen loopt parallel aan de Hunze het afwateringskanaal Leiding 2 richting het Zuidlaardermeer, zie Figuur 4-1. Tussen het afwateringskanaal en de Hunze loopt momenteel al een watergang. Bij een kadebreuk benedenstrooms van Nieuw Annerveen zou de afvoer van de Hunze (gedeeltelijk) afgeleid kunnen worden naar Leiding 2. In tegenstelling tot de Hunze liggen in de buurt van Leiding 2 geen dorpskernen. Leiding 2 is momenteel echter onbedijkt. Bij grotere afvoer kan het kanaal buiten zijn oevers treden en landbouwgrond inunderen.

Doordat de kering momenteel al onder IPO klasse I valt wordt dit in deze rapportage niet nader

uitgewerkt. Zaken die beschouwd moeten worden om het in de praktijk te brengen zijn onder andere:

- Bepalen hoeveel debiet Leiding 2 aan kan, zonder dat dit leidt tot waterstanden waarmee het kanaal buiten zijn oevers treedt of waarbij infrastructuur rondom Leiding 2 (duikers, inlaten, et cetera) niet meer functioneert.
- Bepalen van een geschikte afvoerdeling tussen de Hunze en Leiding 2 in geval van hoogwater.
- Uitwerken van een regelwerk dat deze afvoerdeling kan bewerkstelligen.
- Uitwerken van de kosten (investeringskosten regelwerk, schade aan infrastructuur) en baten (verminderen van schade door overstroming langs de Hunze) van een dergelijke maatregel ten opzichte van de huidige situatie.



Figuur 4-1: Ligging van de Hunze met kades en Leiding 2 (paars)

4.3.3 Decompartimenteren naar westzijde

Over het algemeen zal een doorbraak naar het oosten van de Hunze tot meer schade leiden dan naar het westen van de rivier. Ten oosten van de Hunze zijn namelijk dorpskernen aanwezig, ten westen niet. Om bij een doorbraak de toevoer van water naar het oosten te verminderen zou daarom gekeken kunnen worden naar 'decompartimenteren', waarmee feitelijk wordt bedoeld dat een kade aan de westkant wordt doorgestoken.

Gezien het debiet van ordegrootte 4 m³/s duurt het circa een dag om op 100 hectare een inundatie van 0,1 m te krijgen. Het inrichten van een waterbergingsgebied aan de westzijde zou daarmee mogelijk zijn. Doordat de kering momenteel al onder IPO klasse I valt wordt dit in deze rapportage niet nader uitgewerkt. Zaken die beschouwd moeten worden om het in de praktijk te brengen zijn onder andere:

- Uitzoeken van geschikte waterbergingsgebieden aan de westzijde van de Hunze, waarbij de schade door inundatie beperkt blijft.
- Uitwerken hoeveel schade optreedt bij ingebruikname van een bergingsgebied (zowel schade aan de kade als in het te overstromen gebied).

- Uitwerken hoe deze schade zich verhoudt tot de huidige situatie, oftewel uitwerken van de kosten (schade aan de doorgestoken kering en schade in het te inunderen westelijk gebied) en baten (verminderen van schade in een oostelijk gebied) van een dergelijke maatregel ten opzichte van de huidige situatie.

Het zal hoe dan ook een bestuurlijke afweging zijn om in geval van een calamiteit het gedupeerde gebied te verplaatsen ten koste van de westzijde, om de totale gevolgen van een overstroming te verminderen.

4.3.4 Decompartimenteren naar lager gelegen gebieden

In het huidige overstromingsmodel is ervan uitgegaan dat duikers en sifons tussen twee overstromingsgebieden worden dichtgezet in geval van overstroming, om de schade ruimtelijk beperkt te houden. Mogelijk treedt er minder schade op als het water juist wel wordt door gelaten naar lager gelegen gebieden, omdat daardoor de waterdiepten minder oplopen. Doordat de kering momenteel al onder IPO klasse I valt wordt dit in deze rapportage niet nader uitgewerkt. Zaken die beschouwd moeten worden om het in de praktijk te brengen zijn onder andere:

- Met een nauwkeuriger overstromingsmodel uitwerken wat de verschillen in schade door overstroming zijn tussen het wel en niet dichtzetten van duikers tussen twee (voor dit onderzoek gedefinieerde) overstromingsgebieden.
- Indien het een rendabele optie lijkt: uitwerken of de hoeveelheid duikers of andere openingen voldoende capaciteit heeft om het doorvoeren naar lager gelegen gebieden mogelijk te maken.
- Uitwerken met de omgeving en de calamiteitenorganisatie wat de verantwoordelijkheden tijdens calamiteiten zijn om dergelijke stromingen naar lager gelegen gebieden mogelijk te maken en bij welke scenario's deze maatregel in werking moet worden gezet.
- Uitwerken van de kosten (schade in lager gelegen gebieden) en baten (verminderen van schade door kleinere inundaties) van een dergelijke maatregel ten opzichte van de huidige situatie.

Ook hier geldt dat het een bestuurlijke afweging zal zijn om het te overstroomde gebied te vergroten naar lager gelegen gebieden, als dit leidt tot kleinere inundaties en daarmee tot lagere totale gevolgen van een overstroming.

5 Medegebruik

5.1 Scope

- Doel: in beeld brengen eisen aan stabiliteit en vervorming vanuit medegebruik.
- Te beschouwen: overzicht van eisen aan waterkeringen vanuit medegebruik, inzicht in mogelijk maatgevend zijn van deze gebruikseisen ten opzichte van de normering.

5.2 Verschillende soorten eisen

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar medegebruik dat bepaalde eisen stelt aan de waterkering, die mogelijk maatgevend zijn ten opzichte van de eisen vanuit waterveiligheid.

Medegebruiksobjecten kunnen eisen stellen omtrent vereiste afmetingen voor voldoende hoogte, sterkte en stabiliteit.

Van de eisen voor het medegebruik op de waterkering zijn drie type eisen geconstateerd:

- *Eisen aan Uiterste grenstoestand (UGT)*. De uiterste grenstoestand is de toestand die samengaat met instortingen of constructieve bezwijking (NEN-EN 1990). Een waterkering wordt ontworpen aan de hand van uitgangspunten die betrekking hebben op de omgeving en eisen die gesteld worden aan de stabiliteit en hoogte. De uiterste grenstoestand is de minimale afmeting in combinatie met de maximale belasting waarvoor de stabiliteit nog voldoende is. Mogelijk heeft het medegebruik een strengere stabiliteitseis dan vanuit waterveiligheid nodig is of wordt er normaliter aan de medegebruikfunctie gerekend met een hogere belasting.
- *Eisen aan Bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT)*. De bruikbaarheidsgrenstoestand stelt eisen aan vervormingen, scheurvorming en trillingen. De bruikbaarheidstoestand is de toestand die overeenstemt met voorwaarden waarboven aan de voorgeschreven bruikbaarheidseisen van de constructie niet langer wordt voldaan (NEN-EN 1990). Mogelijk heeft het medegebruik een strengere eis voor vervormingen, scheurvormingen en trillingen dan van vanuit waterveiligheid nodig is. Een voorbeeld is dat vervorming kan leiden tot meer overslag of kwelwater waar de binnendijkse bebouwing last van zal ondervinden. Een ander voorbeeld is dat afschuiving niet direct een bedreiging hoeft te vormen voor de waterveiligheid indien er voldoende restbreedte aanwezig is, maar het is wel een direct probleem voor bijvoorbeeld een weg op de kering.
- *Eisen aan Minimumafmetingen*. De minimumafmetingen voor een object kunnen mogelijk ook maatgevend zijn ten opzichte van de UGT- en BGT-eisen. Een voorbeeld zijn eisen aan bepaalde typen wegen en de breedte van beheerstroken. De benodigde afmetingen van het medegebruik zijn mogelijk maatgevend ten opzichte van de afmetingen van de kering die vanuit waterveiligheid nodig zijn.

Kanttekening

- Medegebruiksobjecten kunnen eisen stellen aan de huidige veiligheidsklasse van de kering, maar kunnen ook andere ontwerpvoorwaarden aan de kering stellen voor een toekomstige situatie (dijkverbetering), zoals restzettingseisen, toelaatbare belastingen, beperkingen in ruimtegebruik, et cetera.

5.3 Verschillende soorten medegebruik

Op de waterkeringen langs de Hunze zijn de volgende onderdelen van medegebruik aanwezig:

- kabels & leidingen in en langs de kering;
- wegen op kering (wandelpaden, fietspaden en autowegen);
- bruggen met aansluiting op kering;
- duikers en/of inlaten onder kering;
- gemaal door kering;
- flora en fauna .

Er zijn geen gebouwen op de kering aanwezig. De onderdelen hebben ieder hun eigen eisen waaraan ze getoetst zijn voor het ontwerp en getoetst moeten worden gedurende de levensduur.

5.4 Betrouwbaarheid volgens Eurocode en IPO-normering

Veel medegebruiksobjecten op of nabij de waterkering worden ontworpen volgens de Eurocode. Zowel de Eurocode als de IPO-normering gaat uit van een bepaalde betrouwbaarheid waar respectievelijk het object of de regionale kering aan moet voldoen.

Kanttekening

- Het vergelijken van Eurocode en IPO-normering is niet geheel juist. De Eurocode is een ontwerpnorm/nieuwbouweis, waarbij ervan uit wordt gegaan dat ontwerpen volgens de norm ervoor zorgt dat het object gedurende de levensduur aan de eisen kan voldoen. De IPO-normering is (mede) bedoeld voor het periodiek toetsen, in dit geval van regionale keringen. Dat bij aanleg iets is gemaakt met een strengere eis geeft daarom niet de garantie dat dit na dertig jaar nog steeds maatgevend is.

5.4.1 Betrouwbaarheid Eurocode

Bijlage B van NEN-EN 1990 'Grondslagen voor het constructief ontwerp' geeft uitleg over de toepassing van de betrouwbaarheid in de Eurocode. Er wordt differentiatie gemaakt in betrouwbaarheid middels gevolgklassen (*Consequence Classes, CC*), opgenomen in Tabel B1 van de betreffende bijlage.

Tabel B1 — Definitie van gevolgklassen

Gevolgklasse CC*	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

De betrouwbaarheidsklassen (*Reliability Classes, RC*) worden onderscheiden door gebruik te maken van het β -betrouwbaarheidsindexconcept. De drie betrouwbaarheidsklassen, opgenomen in Tabel B2 van de bijlage, kunnen één-op-één gerelateerd worden aan de drie gevolgklassen.

Het verband tussen β en de faalkanseis is als volgt:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_{eis})$$

Waarin:

β	Betrouwbaarheidsindex [-]
Φ^{-1}	Inverse standaard normaalverdeling [-]
P_{eis}	Faalkanseis [-]

In Tabel B2 wordt onderscheid gemaakt in een 1 jaar referentieperiode en een 50 jaar referentieperiode. De partiële factoren die in de Eurocode worden gehanteerd, zoals voor geotechnische stabiliteit, zijn veelal afgeleid voor een 50 jaar referentieperiode. De relatie tussen beide referentieperiodes kan één-op-één vertaald worden (dus gemiddeld genomen moet de faalkans per jaar $1/50^e$ van de faalkanseis voor een referentieperiode van 50 jaar zijn), mits de onzekerheid in de belangrijkste belastingen elk jaar statistisch onafhankelijk zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval als de buitenwaterstand de belangrijkste belasting vormt. Voor geotechnische constructies zijn de grondeigenschappen minstens zo belangrijk. De eigenschappen van de grond zijn niet elk jaar statistisch onafhankelijk. In dat geval zal de β voor 1 jaar referentieperiode dichterbij de 50 jaar referentieperiode liggen.

Ter verificatie van Tabel B2 voor in de tijd statisch onafhankelijke belasting:

$$RC\ 2\ P_{eis,1jr} = \Phi(\beta_{1jr}) = \Phi(-4,7) = \frac{1}{768753}$$

$$P_{eis,50jr} = \frac{1}{768753} \times 50 = \frac{1}{15375}$$

$$\beta_{50jr} = -\Phi^{-1}\left(\frac{1}{15375}\right) = 3,8$$

Tabel B2 — Aanbevolen minimumwaarden voor de betrouwbaarheidsindex β (uiterste grenstoestanden)

Betrouwbaarheids- klasse RC	Minimumwaarden voor β	
	1 jaar referentieperiode	50 jaar referentieperiode
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

5.4.2 Betrouwbaarheid IPO-normering

Regionale keringen worden ingedeeld in een kadeklasse op basis van toelaatbare overschrijdingskans (per jaar). De toelaatbare doorbraakkans voor boezemkades is gesteld op 0,20 keer de overschrijdingskans. Middels de inverse standaardnormaalverdeling kan dit vertaald worden in een β . Dit betreft een betrouwbaarheidsindex per jaar. In Tabel 2.1 van Bijlage 1 van de Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen (LTVRW) [2], is dit uitgewerkt. Voor boezemkades geldt een faalkansbegroting met 80% voor macrostabiliteit, 10% voor overloop/golfoverslag en 10% voor overige faalmechanismen. Op basis van de faalkansbegroting kan de vereiste betrouwbaarheid voor bijvoorbeeld macrostabiliteit afgeleid worden.

Tabel 2.1: Kadeklassen, norm-frequenties hydraulische belasting, toelaatbare doorbraakkansen (c.f. MB), en hiermee corresponderende vereiste ("target") betrouwbaarheidsindices, β_T .

Kadeklasse	I	II	III	IV	V
Normfreq. [1/jr]	1/10	1/30	1/100	1/300	1/1000
$P_{doorbr, toel}$ [1/jr]	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
β_T	2,05	2,47	2,88	3,21	3,54

Bij een semi-probabilistische berekening voor macrostabiliteit is de stabiliteitseis als volgt:

$$\frac{F}{\gamma_n \gamma_d \gamma_s} \geq 1$$

Waarin:

F = stabiliteitsfactor berekend bij rekenwaarden van de sterkte [-]

γ_n = schadefactor [-]

γ_d = modelfactor [-]

γ_s = schematiseringsfactor [-]

Hiervoor is de schadefactor per IPO-klasse opgenomen in de LTVRW, Tabel C.4 [2]. Deze is afgeleid aan de hand van de toelaatbare doorbraakkans gerelateerd aan de overschrijdingskans en de standaardfaalkansbegroting.

Tabel C.4 Vereiste schadefactor stabiliteit binnentalud – boezemkaden en keringen langs regionale rivieren

Normfrequentie waterkering [1/jaar]	Schadefactor [-]
1/10	0,8
1/30	0,85
1/100	0,9
1/300	0,95
1/1000	1,0
1/1250	1,1

De modelfactor bedraagt 1,0 voor rekenmodel Bishop en 1,05 voor rekenmodel UpliftVan [2]. De schematiseringsfactor is afhankelijk van de onzekerheden in de schematisering en ligt tussen de 1,0 en 1,3. De minimumwaarden van het product van de partiële factoren (modelfactor 1,0 en schematiseringsfactor 1,0) en de maximumwaarden (modelfactor 1,05 en schematiseringsfactor 1,3) zijn weergegeven in Tabel 5-1.

Tabel 5-1: Product van partiële factoren per IPO-klasse

IPO klasse	$\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_s$ (minimum)	$\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_s$ (maximum)
I	0,80	1,09
II	0,85	1,16
III	0,90	1,23
IV	0,95	1,30
V	1,00	1,37

Als voorbeeld van wat bovenstaande tabel uitbeeldt: bij een semi-probabilistische stabiliteitsberekening met ongunstige partiële factoren voor een IPO-klasse III kering moet de berekende stabiliteitsfactor groter zijn dan 1,23 om te voldoen aan de stabiliteitseis.

5.4.3 Vergelijking Eurocode en IPO-normering

Voor het vergelijken van de betrouwbaarheid van de uiterste grenstoestand conform Eurocode en IPO-normering kan gebruik gemaakt worden van de gemeenschappelijke veiligheidsfilosofie in de vorm van de betrouwbaarheidindex β . Bij een volledig probabilistische benadering zou dit tot dezelfde resultaten moeten leiden.

Bij een (gangbare) semi-probabilistische benadering moet wel met het volgende rekening worden gehouden:

- Conform Eurocode wordt vaak gewerkt met een betrouwbaarheid over een referentieperiode van bijvoorbeeld 50 jaar, waar conform IPO-normering wordt gekeken naar de betrouwbaarheid per jaar.
- De Eurocode (bijvoorbeeld NEN9997-1 voor grondconstructies) maakt gebruik van andere materiaalfactoren en materiaalmodellen dan de IPO-normering zoals opgenomen in de LTVRW.
- De IPO-normering zoals opgenomen in de LTVRW maakt gebruik van aanvullende partiële factoren, waar de NEN9997-1 dit niet doet.

Het vergelijken van de vereiste betrouwbaarheid tussen Eurocode en IPO-normering is daarmee niet eenvoudig. Bij toetsing aan de IPO-normering met gunstige partiële factoren volgens de LTVRW (zie Tabel 5-1) in vergelijking met toetsing conform RC1 Eurocode, zal toetsing volgens de Eurocode tot een hogere betrouwbaarheid leiden. Door het meenemen van ongunstige partiële factoren, kan het zijn dat zelfs toetsing aan IPO klasse-I in een hogere betrouwbaarheid resulteert dan RC1 volgens de Eurocode. Dat betekent ook dat bijvoorbeeld een wegconstructie op de kering, ontworpen volgens RC1, geen garantie geeft dat de kering waar deze op ligt ook vanuit waterveiligheid voldoende stabiel is.

Opmerking

- De grootte van de partiële factoren, zoals de schematiseringsfactor, kan dus bepalend zijn voor wat maatgevend is: LTVRW of Eurocode. Bij een geoptimaliseerde schematiseringsfactor van 1,0 is de minimaal vereiste veiligheidsfactor 0,90. Bij een conservatieve schematiseringsfactor van 1,3 is de minimaal vereiste veiligheidsfactor 1,23. Zie ook het rekenvoorbeeld op de volgende pagina.

Om gevoel te krijgen bij de verschillen in veiligheid volgens de Eurocode en IPO-normering, is volgens beide filosofieën een stabiliteitsberekening gemaakt. Hiervoor is een bestaande stabiliteitsberekening gebruikt uit de toetsing. De volgende stappen zijn doorlopen:

- Om de bestaande stabiliteitsberekening aan te passen naar een berekening volgens de Eurocode (NEN9997-1) zijn de rekenwaarden van de materiaalparameters omgerekend naar karakteristieke waarden (met de materiaalfactoren uit de Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen, LTVRW) en vervolgens teruggerekend naar rekenwaarden middels de materiaalfactoren uit NEN9997-1 voor klasse RC1.

Grondsoort	Rekenwaarde LTVRW		Rekenwaarde NEN9997-1	
	c'_{rek} [kN/m ²]	φ'_{rek} [°]	c'_{rek} [kN/m ²]	φ'_{rek} [°]
H_Vhv_v (veen)	0,5	29,0	0,58	30,00
P_Om_zf (zand)	0,0	27,08	0,00	27,08
H_At_t_k (klei dijksmateriaal)	4,0	20,0	3,85	20,00

- Voor een IPO-klasse III kering, zoals de Hunze momenteel is aangewezen, en ongunstige partiële factoren, bedraagt de vereiste stabiliteitsfactor 1,23. De aangeleverde stabiliteitsberekening uit de toetsing voldoet hier met een berekende stabiliteitsfactor van 1,11 niet aan.
- Voor een toetsing van de kering als grondlichaam aan RC1 moet de berekende stabiliteitsfactor groter zijn dan 1,0. Met de aangepaste rekenwaarden wordt een stabiliteit van 1,13 berekend. De aangepaste stabiliteitsberekening voldoet dus wel aan de vereiste betrouwbaarheid van RC1.

5.5 Verhouding eisen medegebruik versus waterveiligheid

In deze paragraaf wordt voor wegen en leidingen ingegaan op welke eisen strenger zijn: Eurocode of waterveiligheid. Hierbij wordt onderscheid gemaakt:

- UGT (betrouwbaarheid: vergelijking β 's);
- BGT (vervormingseisen);
- Minimale afmetingen (leggerprofiel versus objectafmetingen).

5.5.1 Wegen

In het geval van de Hunze lopen er geen wegen over de kering, desondanks wordt dit aspect wel beschouwd. (Historische) wegen op dijken zijn vaak van het type 'erftoegangsweg buiten de bebouwde kom' (ETW bubeko). De 60 km/uur weg zonder markering is van het type ETW-2. Tevens kan een losstaand fietspad aanwezig zijn op regionale keringen. Beide type wegen worden in deze paragraaf beschouwd. Een weglichaam brengt niet zozeer een extra belasting met zich mee ten opzichte van een groene kering, behalve de mogelijk zwaardere verkeersbelasting.

Geotechnische eisen worden gesteld aan de betrouwbaarheid en vervormingen van de aardebaan. Hiervoor worden eisen uit de NEN-EN 1990 'Grondslagen voor het constructief ontwerp' en NEN9997-1 'Geotechnisch ontwerp van constructies' vergeleken met de eisen voor regionale waterkeringen.

5.5.1.1 Betrouwbaarheid

Voor het toetsen op de geotechnische stabiliteit van een weglichaam kan deze in het geval van een erftoegangsweg worden ingedeeld in CC1 (geringe gevolgen). Aangezien onzekerheid in de ondergrond een belangrijke belasting vormt wordt bij benadering aangenomen dat de vereiste betrouwbaarheid voor de 1 jaar referentieperiode overeenkomt met de die van de 50 jaar referentieperiode. Conform de Eurocode hoort bij CC1 een β van 3,3.

Aangezien gekeken wordt naar de geotechnische stabiliteit, wordt deze vergeleken met de vereiste betrouwbaarheid voor macrostabiliteit. Uitgaande van een faalkansruimte van 80% voor macrostabiliteit, leidt dit tot de vereiste β 's uit Tabel 5-2.

Tabel 5-2: Vereiste betrouwbaarheid voor macrostabiliteit per kadeklasse

Kadeklasse	I	II	III	IV	V
Normfreq.	1/10	1/30	1/100	1/300	1/1000
$P_{\text{doorbr, vereist}}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
$P_{\text{doorbr, macro, vereist}}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
$\beta_{\text{doorbr, macro, vereist}}$	2,14	2,55	2,95	3,27	3,60

Vergeleken met de IPO-klassen en de vereiste kans op doorbraak, mag IPO-klasse I tot en met IV voldoen aan de lagere betrouwbaarheid dan $\beta=3,3$ (per jaar). Bij het ontwerpen van (de geotechnische stabiliteit) van een weglichaam is de betrouwbaarheid conform Eurocode dus maatgevend ten opzichte van de stabiliteit vanuit waterveiligheid. De kanttekening die hierbij gemaakt moet worden is dat bij een semi-probabilistische benadering de partiële factoren uit de LTVRW ertoe kunnen leiden dat deze conclusie niet op gaat.

Kanttekening

- De materiaalmodellen en fysica van de Eurocode en de LTVRW worden anders beschreven. Hierdoor wordt het vergelijken zeer lastig gemaakt.
- Uit bovenstaande blijkt dat voor de stabiliteit van een weglichaam de Eurocode theoretisch maatgevend zal zijn boven de IPO-normering. Desondanks wordt hier in de praktijk weinig invulling aangegeven. Bij kadeverbeteringsprojecten wordt de stabiliteit van de kering ontworpen op de vereiste IPO-klasse, rekening houdend met verkeersbelasting vanuit de weg. Een separate toets op stabiliteit volgens de Eurocode wordt hierbij niet uitgevoerd.
- Indien zowel op basis van IPO-normering en op basis van Eurocode een ontwerpprofiel wordt bepaald en het profiel conform Eurocode groter uitvalt, zullen discussies ontstaan over de financiering. Het waterschap heeft immers alleen de verplichting de waterkering aan de bijbehorende IPO-klasse te laten voldoen.
- In deze paragraaf wordt de nieuwbouweis Eurocode vergeleken met de toetsing conform de LTVRW. De nieuwbouweis wordt maar één keer (bij de aanleg) geverifieerd, daarna wordt het niet meer getoetst. Afkeurniveaus Eurocode zijn soepeler en enkel beschreven voor bouwwerken; niet voor grond. Als er een constructie is gemaakt met een eis die strenger is geeft dat niet de garantie dat dat over dertig jaar nog steeds zo is.

5.5.1.2 Vervormingen

Bij weglighamen spelen zowel de absolute zettingen als verschilzettingen een rol. De NEN9997-1 geeft geen harde eisen voor zettingen. Bij de geotechnische normering worden de toelaatbare zettingen van de ondergrond namelijk bepaald door wat de bovenbouw aan kan, in dit geval een weg.

In het Deltares rapport 'Bouwen op slappe bodems' worden algemene zettingseisen aan wegen gegeven die door het CROW in 2014 zijn geïnterviewd middels interviews [10]. Hieruit is gebleken dat aan de absolute eindzetting geen beperkingen worden gesteld, wel aan de restzetting na het aanbrengen van de verharding. Voor provinciale wegen, waar de erftoegangsweg onder valt, geldt een restzettingseis van 0,15-0,30 m over dertig jaar na ingebruikname van de weg. Deze eisen worden onder andere gesteld in verband met rijcomfort, veiligheid en afwatering. Voor de aansluiting op kunstwerken (die niet/minder zetten) kunnen strengere eisen gelden.

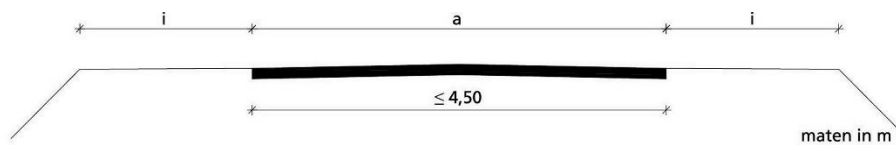
Aan regionale keringen worden niet per se eisen aan zettingen gesteld, mits er in het ontwerp maar rekening mee wordt gehouden. Dit betreft zowel het waarborgen van de vereiste kruinhoogte (binnen de planperiode) als voldoende stabiliteit bij vervormingen van het hele dijklichaam. Zettingen van de kering van meer dan 1 cm/jaar zijn op slappe grond niet ongebruikelijk, waardoor de eisen aan een weglighaam strenger kunnen zijn. De keringen langs de Hunze liggen op een meer zandige ondergrond, waardoor dit naar verwachting minder is. Hier lijken de zettingseisen niet voor extra randvoorwaarden te zorgen bij het ontwerp van de waterkering.

Overige aspecten

- De kruinhoogte bij regionale keringen wordt vaak dusdanig ontworpen dat de **overslag** in maatgevende omstandigheden kleiner is dan 0,1 l/s/m. Als meer richting een overstromingskansbenadering zou worden gegaan, kan mogelijk meer overslag worden toegestaan. In dat geval kan de gebruiksfunctie van de weg op de kruin maatgevend worden boven de eisen vanuit waterveiligheid voor de toelaatbare hoeveelheid overslag.
- Vanuit waterveiligheid kan in de toetsing overwogen worden een **restprofielbenadering** toe te passen om aan te tonen dat de kans op overstroming na een initiële afschuiving voldoende klein is. In dat geval wordt vanuit waterveiligheid alsnog aan de vereiste betrouwbaarheid voldaan. Indien een (drukke) weg op de kruin ligt, is een afschuiving niet gewenst. De vereiste kans van optreden van een afschuiving als weglighaam kan daarmee maatgevend zijn ten opzichte van de vereiste kans vanuit waterveiligheid.
- Er is nu alleen gekeken naar de vereiste betrouwbaarheden van de stabiliteit als weglighaam of als waterkering. Naast de (macro)stabiliteit kunnen ook **andere mechanismes** bepalend zijn voor de dimensionering van het grondlichaam, zoals golfafslag van het buitentalud of erosie door sterke stromingen. Voor de Hunze is dit geen relevant mechanisme.

5.5.1.3 Minimale afmetingen

Het te verwachten type weg ('erftoegangsweg buiten de bebouwde kom, type 2' (ETW-2 bubeko) heeft standaardafmetingen. De verhardingsbreedte is minimaal 2,50 m en idealiter 4,5 m. Aan weerszijden dient zich daarnaast een berm te bevinden van minimaal 1,50 m. De minimale breedte van de verharding plus bermen is daarmee 5,50 m, zie Figuur 5-1 [9].



	ideaal	gebruikelijk	minimaal
a rijloper (= verhardingsbreedte)	4,50	3,50	2,50
i buitenberm/obstakelvrije zone	³⁾	2,50	1,50

3) geen grenswaarde aan ideaal, wel groter dan 'gebruikelijk'

Figuur 5-1 Standaardprofiel ETW-2 [9]

Een vrijliggend recreatief fietspad heeft een breedte van minimaal 2,00 m. Voor hogere intensiteiten zijn grotere breedtes nodig [9].

Voor regionale keringen geldt standaard een minimale kruinbreedte van 1,50 m [2]. In dat geval zijn de standaardafmetingen van zowel een ETW-2 weg als vrijliggend fietspad maatgevend voor de (kruin)breedte van de kering.

5.5.2 Leidingen

Totaal zijn er zes risicovolle buisleidingen die de Hunze kruisen en één leiding die enkele meters parallel langs de kering loopt nabij de NAM-locatie (zie Figuur 3-14). Onduidelijk is of er ook andere leidingen parallel aan de kering van de Hunze liggen. In onderstaande paragrafen gaan we wel in op deze parallelle leidingen. De vraag is of een parallelle leiding in de binnenkruinlijn een stabiliteitseis stelt die hoger is dan de eis voor waterveiligheid.

5.5.2.1 Betrouwbaarheid

Door de POV Kabels&Leidingen is afgelopen jaren een vertaling gemaakt van de veiligheidsfactoren van Eurocodes naar betrouwbaarheidsindices. In de NEN3651 staat dat in boezemwaterkeringen uitsluitend leidingen in lengterichting mogen worden gelegd indien de waterkering verheeld ligt met opgehoogd terrein en het theoretische profiel van de waterkering bij leidinglekage niet wordt aangetast of dat (voor gasleidingen met $p_a < 0,1$ MPa en vloeistofleidingen met $H^3D_i^5 < 40m^8$):

- er geen reële mogelijkheid is voor een ander tracé van de leiding;
- de leiding voldoet aan de eisen die voor leidingen binnen veiligheidszones gelden.

Als voorwaarde geldt dat bij breuk het theoretische profiel van de waterkering aanwezig moet blijven of dat wordt aangetoond dat de toelaatbare disfunctiekans van de waterkering, voortvloeiend uit de aanwezigheid van de leiding, niet wordt overschreden. Hiervoor moet een stabiliteitsbeschouwing worden uitgevoerd en een risicoanalyse van het niet-functioneren van de waterkering. Dit om aan te tonen dat de situatie aanvaardbaar is bij een adequaat beheer van de leiding gedurende de bedrijfsvoering en compensatoire maatregelen, bijvoorbeeld het plaatsen van damwanden.

De toelaatbare disfunctiekans van de waterkering is 7×10^{-12} per m per jaar (NEN3651).

Opmerking

- Deze disfunctiekans van de waterkering van 7×10^{-12} per meter per jaar is gelijk aan een faalkans van 1/143.000.000.000 per meter en $\beta=6,76$ per meter. Met de formule waarbij het lengte effect wordt meegenomen (enkele paragrafen hieronder) zal de disfunctiekans voor de referentielengte van 5km $3,5 \times 10^{-8}$ per jaar worden. Hierbij hoort $\beta=5,39$.

Het feit dat de faalkans van leidingen wordt uitgedrukt in een waarde per (k)m per jaar maakt duidelijk dat er bij de formulering van de betrouwbaarheidseis nog een moeilijkheid ligt. De eis moet gerelateerd worden aan een lengte. Voor de Nederlandse situatie lijkt een waarde van 5 tot 10 km een redelijke maat.

Volgens het Bouwbesluit (NEN 6700) moet de hoofddraagconstructie van belangrijke constructie-elementen worden ingedeeld in veiligheidsklasse 3. Hiermee correspondeert volgens die norm een ondergrens voor de betrouwbaarheidsindex β gelijk aan 3,6 voor de referentieperiode (ontwerplevensduur) die wij voor pijpleidingen op vijftig jaar kunnen stellen (Uiterste Grenstoestand, UGT). De waarde van 3,6 volgt uit kalibratie met vroegere ontwerprichtlijnen.

De lengte van een leiding heeft invloed op de faalkans. In elke strekking van de buis kunnen zich ongunstige situaties voordoen, bijvoorbeeld via ongunstige afwijkingen van de grondparameters, materiaaleigenschappen of de initiële onrondheid en de kans op een ongunstige waarde neemt toe met de leidinglengte. Omgekeerd treedt een gunstig volume-effect op als de hoeveelheid grond die bij een mechanisme gemobiliseerd wordt groter wordt. Hoe meer materiaal, hoe meer de fluctuaties kunnen uitmiddelen. Zo zal bij een glijvlak van een dijk de lokale punt-tot-punt-variatie niet van belang zijn.

Bij de verwerking van beide aspecten in de rekenwaarde is het begrip correlatieafstand of fluctuatieschaal van belang. De fluctuatieschaal ΔL geeft de afstand aan waarover een grootheid hoog gecorreleerd is (weinig van grootte verandert). Al deze lengten hebben een invloed op de correlatielengte van het mechanisme. Bij grondparameters in natuurlijke afzettingen kan men voor ΔL denken aan een waarde in de orde van 20-50 m (horizontaal) en 1-2 m (verticaal).

We maken gebruik van de volgende bovengrensschatting voor de kans op bezwijken met inbegrip van het lengte-effect:

$$P(F_{leiding}) = \frac{L}{\Delta L} P(F_{lokaal})$$

L is de referentielengte van de leiding (bijvoorbeeld 5-10 km)

ΔL is de lengte waarover de relevante parameters sterk gecorreleerd zijn.

Voor lokaal te hanteren betrouwbaarheidsindex heeft dat het volgende gevolg ($L = 5$ km en $\Delta L = 50$ m voor een veldstrekking):

Tabel 5-3 Betrouwbaarheidsindex UGT globaal en lokaal voor parallel aan de waterkering liggende leidingen [TNO 2020 Omrekening van Unity Check naar faalkans]

		Lengte [m]	Betrouwbaarheidsindex β [-]
Veld	Globaal UGT	5000	3,6
	Lokaal UGT	50	4,7 (4,8 voor 10 km globaal)

Aangezien gekeken wordt naar de faalkans van de waterkering gelden de vereiste β 's voor betrouwbaarheid van de waterkering uit Tabel 2.1 uit de LTVRW:

Tabel 2.1: Kadeklassen, norm-frequenties hydraulische belasting, toelaatbare doorbraakkansen (c.f. MB), en hiermee corresponderende vereiste ("target") betrouwbaarheidsindices, β_T .

Kadeklasse	I	II	III	IV	V
Normfreq. [1/jr]	1/10	1/30	1/100	1/300	1/1000
$P_{doorbr, toel}$ [1/jr]	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
β_T	2,05	2,47	2,88	3,21	3,54

Vergeleken met de IPO-klassen en de vereiste kans op doorbraak, mag IPO-klasse I tot en met V voldoen aan de lagere betrouwbaarheid dan $\beta=3,6$ (per jaar). Bij het ontwerpen van een leiding is de betrouwbaarheid conform Eurocode dus maatgevend ten opzichte van de stabiliteit vanuit waterveiligheid.

Kanttekening

- Uit bovenstaande blijkt dat de Eurocode maatgevend is boven de IPO-normering. Het gaat erom dat de kering niet in gevaar komt door leidingfalen. Ten tweede moet de leiding stabiel blijven bij een afschuiving. Indien dat zo is, leidt dat niet tot eisen voor het grondlichaam. Er moet dus onderscheid worden gemaakt in eisen van leiding op de dijk versus eisen van de dijk op de leiding.
- Nieuwe leidingen: Zoals duidelijk wordt in het vorige geel gekleurde blok is dat de leiding zo wordt ontworpen dat er geen waterveiligheidsissues ontstaan. Dit komt dus neer op de eisen die worden gesteld van de dijk op de leiding.
- Bij deze ontwerpeisen wordt aanbevolen vast te stellen welke toekomstige aanpassingen van het werk door de beheerder zijn voorzien (bijvoorbeeld dijkverzwaring, kadeverbetering, weg- of vaarwegverbreding en vaardieptevergroting). Dit geldt ook voor voorgenomen ingrepen in het aangrenzende terrein zoals polderpeilverlagingen (Eurocode).
- Bestaande leidingen: Door het ILT wordt aangegeven dat er een faalkans- en risicoanalyse van bestaande leidingen in waterkeringen moet worden uitgevoerd (in overleg met beheerder) als bij de periodieke beoordeling niet kan worden aangetoond dat de leiding voldoet aan de NEN 3651, of bij een dijkversterking waar de bestaande leiding niet kan voldoen aan waterstaatkundige voorzieningen uit NEN 3651.
- In deze faalkans- en risicoanalyse wordt de additionele faalkans van de waterkering door lekkage/breuk of explosie van de leiding bepaald. Daarnaast wordt de toelaatbare disfunctiekans van de waterkering per situatie vastgesteld op basis van de norm in de Waterwet. Indien de berekende additionele disfunctiekans geringer is dan de toelaatbare waarde, dan voldoet de leiding.
- Conclusie: Er wordt enkel gekeken naar de eisen van de dijk op de leiding en niet naar de eisen van de leiding op de dijk.

In het geval van een lage IPO-klasse kering is de toelaatbare disfunctiekans hoog. De bestaande leiding zal dan in de meeste gevallen voldoen aangezien deze met een zeer hoge β wordt ontworpen.

5.5.2.2 Vervormingen

Voor de bruikbaarheidsgrenstoestanden (BGT) gelden in het algemeen geen wettelijk vastgestelde eisen. Hier kan de ontwerper dus zelf kiezen. Meestal wordt een betrouwbaarheidsindex van $\beta = 1,8$ gekozen. Deze waarde volgt uit kalibratie met vroegere ontwerprichtlijnen. Net als voor de uiterste grenstoestand is de globale en lokale betrouwbaarheidsindex bepaald:

Tabel 5-4 Betrouwbaarheidsindex BGT globaal en lokaal voor parallel aan de waterkering liggende leidingen [TNO 2020 Omrekening van Unity Check naar faalkans]

		Lengte [m]	Betrouwbaarheidsindex β [-]
Veld	Globaal BGT	5000	1,8
	Lokaal BGT	50	3,4 (3,6 voor 10 km globaal)

De globale betrouwbaarheidsindex van 1,8 is hierbij gelijk aan een kans van 1/28 jaar. Met een lage IPO-klasse kering is de kans groot dat er vervormingen ontstaan. Deze vervormingen zullen zorgen voor een steeds groter wordende druk op de leidingen. Deze leidingen zijn wel ontworpen op toekomstige dijkverzwaringen, maar vervormingen van de kering worden niet direct meegenomen.

Een leiding in parallellegging in de veiligheidszone moet wel op faalmechanismen worden getoetst. Spanningen (sterkte) en vervormingen (stijfheid, deflectie, implosie) door inwendige druk en externe belastingen moeten worden onderzocht, berekend en getoetst volgens NEN 3650-1 en het desbetreffende materiaaldeel (NEN 3650-2, -3, -4 of -5). Deze externe belastingen zijn dan bijvoorbeeld de vervormingen van de kering. In de NEN wordt hier echter niet specifiek op ingegaan. Bijvoorbeeld wat er moet worden aangenomen door vervorming van een kering.

5.5.2.3 Minimale afmetingen

De minimale gronddekking boven de leiding ter plaatse van de kades en de veiligheidszones moet 1 m bedragen (NEN 3651:2020). Het minimale profiel van de kering hangt af van de benodigde betrouwbaarheid.

Overige aspecten

- In dit hoofdstuk wordt nu enkel ingegaan op leidingen in de binnenkruinlijn, echter zijn leidingen in de binnenteen ook mogelijk.
- Bij de toetsing van regionale keringen wordt niet gekeken naar de gewenste betrouwbaarheid van de leiding, waarvan het waterschap geen eigenaar is.
- Indien zowel op basis van IPO-normering als op basis van Eurocode een ontwerp-profiel wordt bepaald en het profiel conform Eurocode groter uitvalt, zullen discussies ontstaan over de financiering. Instabiliteit is meer een probleem van de leidingexploitant dan van de keringbeheerder, dus wie betaalt er dan voor grotere dimensionering van de kering?
- Leidingen moeten periodiek worden getoetst op de NEN 3651, maar het is onduidelijk of dit wordt gehandhaafd. Met deze toets wordt enkel de sterkte van de leiding gecheckt. Niet de stabiliteit van de kering en wat voor extra druk vervormingen geven op de leiding.

6 Overstromingskans

- Doel: in beeld brengen daadwerkelijke sterkte van de kering in relatie tot de genormeerde overstromingskans en vertaling overstromingskans in eisen aan de kering.
- Te beschouwen: werkelijke overstromingskans, relatie tussen overstromingskans en overschrijdingskans waterstand, inzicht in tijd en middelen om toetsing uit te voeren.

6.1 Keuze methode overstromingskansbenadering

De bedoeling van deze paragraaf is om voor de pilot aan te geven welke toetsmethode(n) toegepast kan/kunnen worden, gezien de aard van het watersysteem en dimensie van de keringen. Het doel is een methode te kiezen waarmee met zo min mogelijk inspanning de toetsing kan worden uitgevoerd.

Eigenschappen pilot

De kering langs de Hunze heeft een aantal eigenschappen die wellicht kunnen leiden tot een keuze voor een toetsmethode of -methoden:

- Groot verval van NAP +5,5 m naar +1,5 m.
- Waterhoogte afhankelijk van regenwater/kwelwater.
- Hoog achterland en veel restbreedte in de keringen.
- Waterhoogtevariatie door het jaar heen verschilt; bij de Lenten (Gieterveen) max 100 cm, bij de andere locaties langs de Hunze is het meer rond de 50 cm.
- Zeer weinig grondonderzoek.
- Laatste toetsing: ondergrond onzeker, dus gewerkt met scenario's voor piping en macrostabiliteit.

Keuze methode

In onderstaand overzicht zijn de verschillende soorten methoden weergegeven, met omschrijving, voor- en nadelen (overgenomen uit de koploper pilot Ommoord) en de keuze voor de pilot "Regionale rivier - landelijk".

Methoden	Omschrijving	Voordelen	Nadelen	Keuze pilot
Semi-probabilistische methodes	In een semi-probabilistische berekening wordt – uitgaande van karakteristieke parameterwaarden en van partiële factoren - een schadefactor/veiligheidsfactor berekend, die aan de hand van een gekalibreerde relatie wordt gerelateerd aan de betrouwbaarheid (β). Dit is vergelijkbaar met de huidige beoordelingsmethodiek voor STBI.	Een semi-probabilistisch format dat vergelijkbaar is met het huidige, maakt het mogelijk oude berekeningen te hergebruiken. Relatief eenvoudige methode	Minder nauwkeurig doordat 'bewezen sterkte' niet wordt meegenomen. In de huidige praktijk zien we vaak dat lage stabiliteits- en veiligheidsfactoren worden berekend voor keringen die er al lang liggen, zonder enige schade.	Nee, want deze kering is in afgelopen toetsing al semi-probabilistisch beoordeeld. Kan dus wel, maar niet interessant om nu weer te beschouwen

Methode	Omschrijving	Voordelen	Nadelen	Keuze pilot
Semi-probabilistische methodes met bewezen sterkte in de kalibratie	Vergelijkbaar met bovenstaande, met als aanscherping dat in de kalibratie van de relatie schadefactor-betrouwbaarheid bewezen sterkte wordt meegenomen. Dit kan (1) rekenkundig gebeuren, voor elke casus in de kalibratie (nauwkeurig, veel werk) of (2) op portefeuilleniveau (grof, relatief snel)	Zelfde voordelen als bovenstaande. Nauwkeuriger dan bovenstaande	Kalibratie kost meer inspanning dan bovenstaande, omdat bewezen sterkte moet worden meegenomen in de probabilistische kalibratie-berekeningen	Nee, aangezien de maatgevende situatie veel verschilt van de dagelijkse (bewezen) situatie. Bovendien is er weinig bekend over historische gekeerde hoogwaters.
Probabilistische methodes	De betrouwbaarheid van een kering wordt bepaald d.m.v. volledig probabilistische berekeningen.	Nauwkeuriger dan semi-probabilistische methodes; de betrouwbaarheid wordt niet geschat d.m.v. kalibraties.	Kosten meer inspanning dan semi-probabilistische methodes. Zonder bewezen sterkte zullen nog steeds te hoge faalkansen worden berekend.	Nee, aangezien de kering zeer robuust is en dit uit de semi-probabilistische toetsing al is gebleken. Een nog nauwkeuriger methode is niet nodig.
Probabilistische methodes i.c.m. bewezen sterkte per berekening	Vergelijkbaar met bovenstaande, met als verschil dat in de probabilistische berekeningen bewezen sterkte wordt geïntroduceerd.	Zeer nauwkeurig, door het gebruik van bewezen sterkte	Methode is bewerkelijk en kost veel tijd.	Nee, zie Probabilistische methodes
Probabilistische methodes i.c.m. bewezen sterkte op portefeuilleniveau	Vergelijkbaar met bovenstaande, met als verschil dat bewezen sterkte niet voor elke berekening rekenkundig wordt meegenomen, maar op een grovere manier, door de rekenkundige resultaten te spiegelen aan de ervaringen binnen een gebied.	Nauwkeuriger dan probabilistische methodes Sneller dan probabilistische methodes met bewezen sterkte per berekening	Minder nauwkeurig dan probabilistische methodes met bewezen sterkte per berekening	Nee, zie Probabilistische methodes

Methode	Omschrijving	Voordelen	Nadelen	Keuze pilot
<p>Basisfaalkansen en likelijkheid ratios (levee screening tool)</p>	<p>Een fragility curve van een kering wordt opgesteld, door basisfaalkansen aan de kering toe te kennen, en deze te vermenigvuldigen met 'scores' voor verschillende indicatoren (o.b.v. inspectie). Met deze scores wordt de basisfaalkans (en de ligging van de fragility curve) verhoogd bij aangetroffen schades, en verlaagd bij uitblijven van schade. Door de fragility curve te combineren met de kansdichtheid van de waterstand, volgt een totale faalkans/betrouwbaarheid. In het geval de waterstand nauwelijks varieert, is geen fragility curve nodig, een basisfaalkans volstaat dan.</p>	<p>Relatief snelle, simpele methode</p> <p>Maakt gebruik van waarnemingen in het veld</p>	<p>Grove methode, en daarmee niet heel nauwkeurig</p>	<p>Nee, aangezien geen waterstandsstatistiek aanwezig is. Gezien de grote breedte van de kering is het echter aannemelijk dat de stabiliteit in sommen wordt goedgekeurd. Daarom is het ook goed om te kijken naar de werkelijke sterkte door resultaten van inspecties te bekijken en te vergelijken.</p>
<p>Basisfaalkansen en likelijkheid ratios +</p>	<p>Uitgebreidere methode van bovenstaande. In bovenstaande methode is het opstellen van fragility curves heel eenvoudig, met alleen een basisfaalkans voor een waterstand gelijk aan de top van de kering. In deze uitgebreidere methode wordt de fragility curve gedetailleerder bepaald. Voor verschillende configuraties (gebied, type kering, ondergrond, geometrie) worden middels probabilistische berekeningen fragility curves afgeleid. Voor de te beoordelen kering wordt vervolgens een van deze</p>	<p>Zelfde voordelen als bovenstaand</p> <p>Nauwkeuriger dan bovenstaand, doordat fragility curves gedetailleerder worden afgeleid</p>	<p>Ontwikkeling van fragility curves voor verschillende configuraties kost veel tijd</p>	<p>Nee, zie Probabilistische methodes</p>

Methode	Omschrijving	Voordelen	Nadelen	Keuze pilot
	curves toegepast op basis van de configuratie. Verder werkt de methode hetzelfde als bovenstaande.			
Expert elicitation ("Amerikaanse methode")	Samen met experts per kering gebeurtenissenbomen invullen en de kansen op knopen inschatten, ondersteund door berekeningen, modellen, lokale data, etc. (Vergelijkbaar met Deskundigen Oordeel Toets op Maat in het WBI)	Zeer nauwkeurig	Kost veel tijd en inspanning	Nee, deze methode is teveel inspanning voor deze kering aangezien de verwachting is dat de sterkte ruim voldoende is door de restbreedte.
Toetsen op degradatie	<p>Startpunt is een nulconditie/ basisveiligheid. Dit is een uitspraak over de betrouwbaarheid/faalkans van de kering, op basis van:</p> <ul style="list-style-type: none"> - eerdere toetsresultaten, of; - een nieuwe faalkansberekening (die slechts eenmalig nodig is). <p>Vervolgens worden gevoeligheidsanalyses gedaan die leiden tot degradatiecurves, die aangeven hoeveel invloed degradatie heeft op de faalkans.</p> <p>Door vervolgens te monitoren op degradatie, en dit te koppelen aan de degradatiecurves, kan de faalkans telkens worden geüpdatet.</p>	<p>Relatief eenvoudige toetsing</p> <p>Sluit goed aan bij waarnemingen in het veld.</p>	<p>Bepalen van een nulconditie vereist wel enige inspanning</p> <p>Het is onbekend of alle mogelijke vormen van degradatie bekend, en of de invloed op de kering goed gemodelleerd/ bepaald kan worden.</p>	Ja, gezien de breedte van de kering is het aannemelijk dat de kering op stabiliteit en piping wordt goedgekeurd. Daarom is het interessant om te kijken naar degradatie van de kering.
Instandhoudingsprofiel	Voor een bepaald traject (of voor een bepaalde configuratie van een kering) wordt een minimaal profiel	Makkelijke toetsing	Een minimaal profiel dient nog steeds te voldoen aan een norm, dus	Ja, de kering blijkt uit de semi-probabilistische toetsing robuust te zijn. Met Instandhoudingsprofielen

Methode	Omschrijving	Voordelen	Nadelen	Keuze pilot
	<p>opgesteld dat veilig genoeg is.</p> <p>Een kering is voldoende betrouwbaar wanneer deze voldoet aan dit instandhoudingsprofiel.</p> <p>Dit profiel moet met beheer en onderhoud in stand worden gehouden.</p>		<p>de vraag blijft: wat is goed genoeg?</p> <p>Afleiden van een minimaal profiel kan, afhankelijk van de nauwkeurigheid, veel tijd kosten.</p> <p>Bij toetsing aan een minimaal profiel wordt geen faalkans berekend, waardoor de actuele sterkte van de kering niet bekend is.</p>	<p>kan op een eenvoudige manier een volgende toetsing worden uitgevoerd. De berekeningen van de vorige toetsing kunnen gebruikt worden om de profielen op te stellen.</p>

Conclusie

Voor de veiligheidsbeoordeling van de kering langs de Hunze blijven er twee methoden over:

- toetsen op degradatie;
- instandhoudingsprofiel.

In dit hoofdstuk wordt een toetsing uitgevoerd middels **instandhoudingsprofielen**.

6.2 Uitgangspunten

De uitgangspunten voor het uitvoeren van de toetsing zijn als volgt:

- Hunze & Aa's werkt met een beheerdersoordeel voor keringen met een lagere kerende hoogte dan 1 m. Deze dijkdelen zijn uitgesloten van de toetsing.
- De toetsing met het instandhoudingsprofiel wordt toegepast in dijkvak 1 (oostzijde) en dijkvak 5 (oost- en westzijde).
- Voor bepaling van het instandhoudingsprofiel zijn de maatgevende stabiliteitsberekeningen uit D-Geostability overgenomen van de toetsing van Waterschap Hunze & Aa's. De maatgevende stabiliteitsberekeningen zijn hierin de berekeningen per overstromingsgebied (oost en west) met de laagste berekende stabiliteitsfactor. De ondergrond en waterstandslijnen worden hierbij direct overgenomen.

Kanttekening waterstanden

- De terugkeertijd van waterstanden in de Hunze zijn ingeschat op basis van een decimeringshoogte van bijvoorbeeld 30 cm en de bekende maatgevende waterstanden behorend bij de huidige normering van IPO-klasse III.
- Deze terugkeertijd van de waterstand is enkel gebruikt voor het bepalen van een faalkans voor de hoogte. De faalkansen voor macrostabiliteit en piping zijn bepaald bij het MHW horend bij IPO III (dus een terugkeertijd van 1/100 jaar), formeel is dit niet helemaal juist maar is het gevolg van 'pionieren' met deze toetsmethode in het kader van de pilot.

6.3 Methode instandhoudingsprofiel

6.3.1 Beschrijving methode

Voor een bepaald traject (of voor een bepaalde configuratie van een kering) wordt een minimaal profiel opgesteld dat veilig genoeg is. Een kering is voldoende betrouwbaar wanneer deze voldoet aan dit instandhoudingsprofiel. Dit profiel moet met beheer en onderhoud in stand worden gehouden.

Het instandhoudingsprofiel moet voldoen aan de minimale veiligheidseisen geldend voor de binnenwaartse stabiliteit, de vereiste hoogte aanwezig over de vereiste breedte, en de minimale kwelweglengte benodigd om piping niet te doen ontstaan. Dit profiel wordt per overstromingsgebied bepaald en voor alle vijf de IPO-classes die allemaal een eigen toelaatbare overschrijdingskans (per jaar) hebben. De toelaatbare doorbraakkans voor boezemkades is gesteld op 0,20 keer de overschrijdingskans. Voor boezemkades geldt een faalkansbegroting met 80% voor macrostabiliteit, 10% voor overloop/golfoverslag en 10% voor overige faalmechanismen.

De ondergrond, stijghoogte en freatische lijn van het instandhoudingsprofiel zijn gebaseerd op de doorsnede met de laagste berekende stabiliteitsfactor voor binnenwaartse stabiliteit van de laatste toetsing van Waterschap Hunze & Aa's. Deze beoordeling was semi-probabilistisch uitgevoerd, onder andere met stabiliteitsberekeningen in D-Geostability. De maatgevende stabiliteitsberekening (laagste stabiliteitsfactor) is gebruikt voor het maken van het instandhoudingsprofiel.

Het instandhoudingsprofiel is per overstromingsgebied afgeleid op basis van vier punten:

- macrostabiliteit;
- piping;
- kruinhoogte;
- kruinbreedte.

1. Macrostabiliteit

Van de maatgevende stabiliteitsberekening is enkel de helling van het binnentalud aangepast; in enkele gevallen is daarbij de sloot in het achterland opgeschoven. Deze helling wordt aangepast tot het voldoet aan de vereiste stabiliteitsfactor per IPO-klasse.

De bodemopbouw met bijbehorende grondparameters, de maatgevende waterstand met freatische lijn en de stijghoogte zijn daarbij niet veranderd. Hooguit is de freatische lijn bij het versteilen of verflauwen van het talud horizontaal verplaatst. De benodigde helling horend bij de vereiste veiligheid van de IPO-klasse is de input voor het instandhoudingsprofiel. Zie 6.3.2 voor de uitwerking van de vereiste veiligheidsfactor.

2. Piping

De minimale kwelweglengte voor IPO I t/m III en IPO IV t/m V is bepaald aan de hand van de rekenregel van Sellmeijer en de parameters en bodemopbouw van de maatgevende stabiliteitsberekening zoals ook is gebruikt in de beoordeling door Hunze & Aa's. Deze kwelweglengte geldt vanuit de buitenteen van de kering. Zo is dit ook toegevoegd in het instandhoudingsprofiel voor de verschillende IPO-classes. Indien zich binnen deze minimale kwelweglengte een sloot bevindt wordt ervan uitgegaan dat de kering niet voldoet aan de eis, horend bij de IPO-klasse (dit is overigens afwijkend van de toetsing van het waterschap). Zie paragraaf 6.3.3 voor de kwelweglengteberekening.

3. Kruinhoogte

De vereiste kruinhoogte is gelijk aan de hoogte van het maatgevend hoogwater plus de waakhoogte. Deze hoogte moet aanwezig zijn over de minimaal vereiste breedte. In het geval van de Hunze is de waakhoogte 30 cm.

4. Kruinbreedte

De minimaal vereiste breedte is in 2014 vastgesteld samen met de provincie Groningen. De minimaal vereiste breedte is afhankelijk van de norm, het type ondergrond, de taludhoogte en de helling van het binnentalud. Hunze en Aa's heeft een figuur gedeeld met de minimaal vereiste kruinbreedte (in meters) langs de Hunze. Voor het gehele traject is dit 1 of 1,25 m. Voor het instandhoudingsprofiel is uitgegaan van een minimaal vereiste kruinbreedte van 1,25 m. Over deze afstand moet de vereiste kruinhoogte aanwezig zijn. Anders voldoet de doorsnede niet aan de hoogte-eis.

Kanttekening afleiden instandhoudingsprofiel

- Om tot een instandhoudingsprofiel te komen moet de toelaatbare overschrijdingskans behorende bij een normklasse vertaald worden naar een bijbehorende overstromingskans en vervolgens het onderverdelen van deze faalkans naar de verschillende faalmechanismes.
- Voor het afleiden van de instandhoudingsprofielen in het kader van deze pilot is gebruik gemaakt van de 'standaard'faalkansbegroting uit de LTVRW met 80% voor macrostabiliteit [2]. Voor macrostabiliteit is vervolgens gebruik gemaakt van de voorgeschreven relatie tussen betrouwbaarheid en schadefactor en zijn de partiële factoren uit de LTVRW gebruikt. Aan de basis van deze toetsing met instandhoudingsprofielen ligt dus alsnog een semi-probabilistische werkwijze conform LTVRW.
- De top-down-route naar het instandhoudingsprofiel (filteren) heeft conservatisme in zich, maar is wel werkbaar. Een vereiste is daarbij wel dat de relatie tussen de overschrijdingskans en overstromingskans voor bovenstaande methode beschikbaar zal moeten blijven. De aanpak berust in zijn geheel op de relatie tussen Bèta en de stabiliteitsfactor. De nauwkeurigheid van de huidige relatie is niet geheel bekend.

Werkwijze toetsen met instandhoudingsprofiel

Het instandhoudingsprofiel is vergeleken met de geometrie van de ingemeten dwarsdoorsneden per 100 m dijkstrekking (exclusief de dijkdelen met een lagere kerende hoogte dan 1 m waarvoor enkel een oordeel wordt vervaardigd door de beheerders). Het is als volgt getoetst:

- Indien de taludhelling van het instandhoudingsprofiel van een bepaalde IPO-klasse past in de geometrie/het binnentalud van de doorsnede voldoet die doorsnede aan de stabiliteit van de bijbehorende IPO-klasse.
- Als de minimale kwelweglengte voor IPO-klasse I t/m III in de doorsnede past voldoet de doorsnede aan de eis voor IPO III, als ook de minimale kwelweglengte voor IPO IV en V in de doorsnede past voldoet de doorsnede aan de eis voor IPO V. Indien het niet past, vanwege bijvoorbeeld een teensloot voldoet de doorsnede niet aan de eis voor piping.
- Indien de vereiste kruinhoogte met de vereiste kruinbreedte past in de doorsnede voldoet deze aan de hoogtetoets.

Overige aspecten

- Wanneer in het verleden een ontwerp is gemaakt van een dijkversterking zou dit profiel ook als een soort instandhoudingsprofiel moeten kunnen dienen voor een geometrische toets. Als dat 'ontwerp'profiel kan worden gebruikt hoeft er niet te worden gerekend aan het afleiden van een passend instandhoudingsprofiel.

6.3.2 Vereiste veiligheid macrostabiliteit

De minimale veiligheidsfactor inclusief het instandhoudingsprofiel wordt bepaald voor de vijf verschillende IPO-classes. Bij een semi-probabilistische berekening voor macrostabiliteit is de stabiliteitseis als volgt:

$$\frac{F}{\gamma_n \gamma_d \gamma_s} \geq 1$$

Waarin:

F = stabiliteitsfactor berekend bij rekenwaarden van de sterkte [-]

γ_n = schadefactor [-]

γ_d = modelfactor [-]

γ_s = schematiseringsfactor [-]

Hiervoor is de schadefactor per IPO-klasse opgenomen in de LTVRW, Tabel C.4 [2]. Deze is afgeleid aan de hand van de toelaatbare doorbraakkans gerelateerd aan de overschrijdingskans en de standaardfaalkansbegroting.

Tabel 6-1 Vereiste schadefactor stabiliteit binnentalud - boezemkades en keringen langs regionale rivieren [LTVRW Tabel C.4]

Normfrequentie waterkering [1/jaar]	Schadefactor [-]
1/10	0,8
1/30	0,85
1/100	0,9
1/300	0,95
1/1000	1,0
1/1250	1,1

De modelfactor bedraagt 1,0 voor rekenmodel Bishop en 1,05 voor rekenmodel UpliftVan [2]. De schematiseringsfactor is afhankelijk van de onzekerheden in de schematisering en ligt tussen de 1,0 en 1,3. Aangezien we voor het instandhoudingsprofiel uitgaan van de slechtst mogelijke bodemopbouw en belastingsituatie (zodat het profiel altijd het ongunstigste profiel zal zijn) mag uit worden gegaan van een schematiseringsfactor van 1,0.

De minimumwaarden van het product van de partiële factoren voor Bishop (modelfactor 1,0 en schematiseringsfactor 1,0) en de maximumwaarden voor het model UpliftVan (modelfactor 1,05 en schematiseringsfactor 1,0) zijn weergegeven in Tabel 5-1.

Tabel 6-2: Minimale veiligheidsfactor voor model Bishop (links) en UpliftVan (rechts) per IPO-klasse

IPO-klasse	$\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_s$ (Bishop)	$\gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_s$ (UpliftVan)
I	0,80	0,84
II	0,85	0,89
III	0,90	0,95
IV	0,95	1,00
V	1,00	1,05

6.3.3 Vereiste kwelweglengte piping

De minimale kwelweglengte voor piping wordt bepaald met Sellmeijer zoals ook is gebruikt bij de semi-probabilistische toets van het waterschap Hunze & Aa's. Er worden twee kwelweglengten berekend (deklaag overal minder dik dan 2 m): voor IPO I t/m III met een veiligheidsfactor van 1,2 en voor IPO IV en V met een veiligheidsfactor van 1,4 (uit LTVRW). De deklaagdikte in de som wordt bepaald voor de doorsnede met het laagste achterland en maatgevende ondergrond (met de hoogste bovenkant zand).

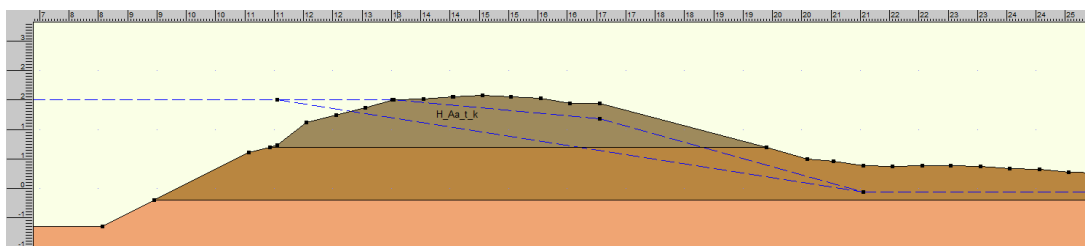
6.4 Instandhoudingsprofiel

De instandhoudingsprofielen zijn afgeleid voor overstromingsbied 1 oost en voor overstromingsbied 5 (oost en west).

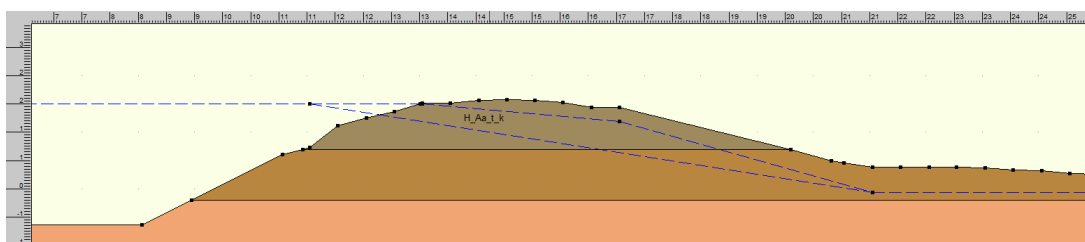
6.4.1 Overstromingsgebied 1

6.4.1.1 Oostzijde

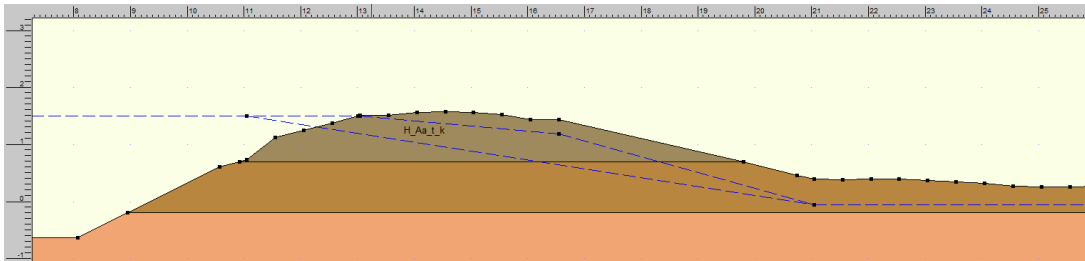
Voor het afleiden van de vereiste taludhelling per IPO-klasse zijn de berekeningen uit de toetsing aangepast totdat precies wordt voldaan aan de vereiste stabiliteitsfactor. Dit is geïllustreerd in onderstaande figuren. In deze pilot is dit voor piping en macrostabiliteit enkel gedaan voor één waterstand, horend bij IPO III (1/100 jaar).



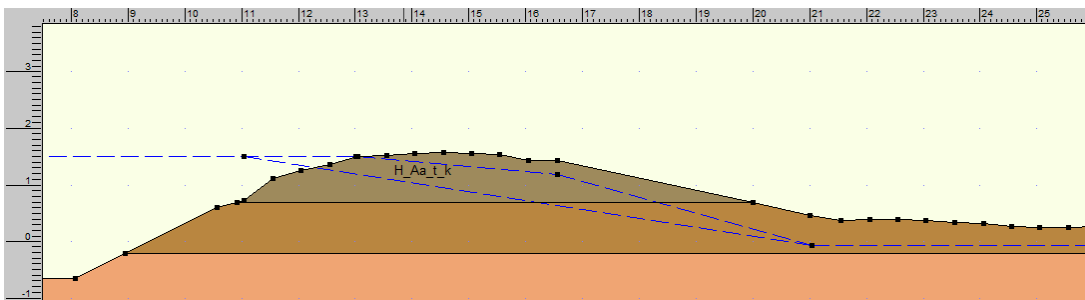
Figuur 6-1: Vereiste taludhelling STBI overstromingsbied 1 oost – IPO-klasse I



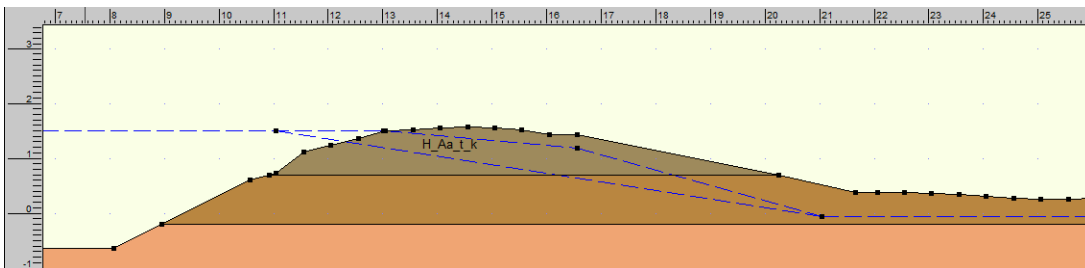
Figuur 6-2: Vereiste taludhelling STBI overstromingsbied 1 oost – IPO-klasse II



Figuur 6-3: Vereiste taludhelling STBI overstromingsbied 1 oost – IPO-klasse III

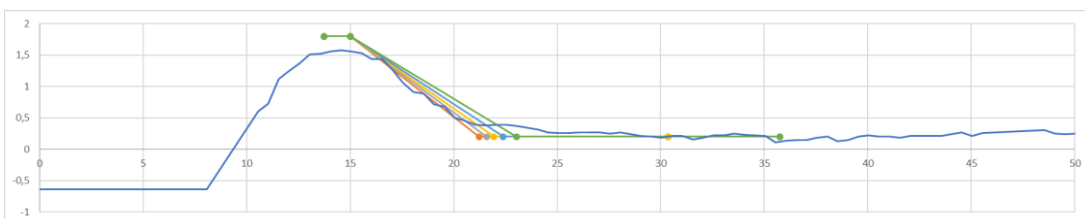


Figuur 6-4 Vereiste taludhelling STBI overstromingsbied 1 oost – IPO-klasse IV



Figuur 6-5 Vereiste taludhelling STBI overstromingsbied 1 oost – IPO-klasse V

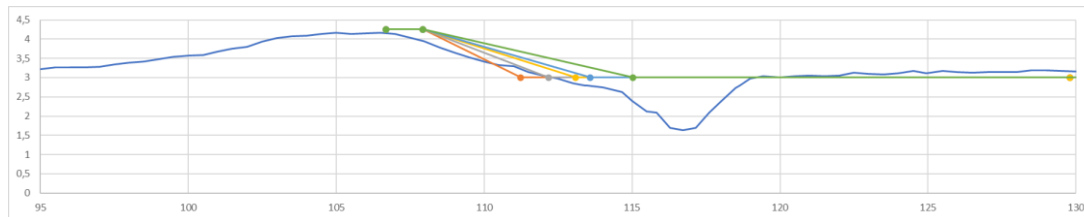
Gebruikmakend van de overige toetsproeven (kruinhoogte/-breedte en piping) is voor overstromingsbied 1 oost het instandhoudingsprofiel opgesteld zoals opgenomen in Figuur 6-6. Ter illustratie is er een doorsnede van dit dijkvak in dezelfde figuur opgenomen. Zoals te zien is, is de kruinhoogte te laag. Het binnentalud komt overeen met IPO-klasse III. Het profiel voldoet op piping voldoende, aangezien er geen sloot aanwezig is binnen de benodigde kwelweglengte.



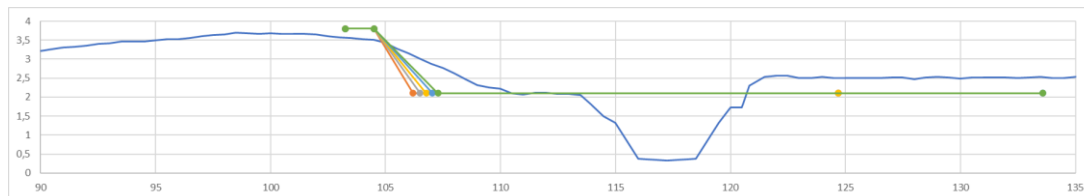
Figuur 6-6: Instandhoudingsprofiel overstromingsgebied 1 oost met de verschillende taludsteilheden horend bij IPO I t/m V en waarbij de projecteerde hoogte hoort bij IPO III

6.4.2 Overstromingsgebied 5

De instandhoudingsprofielen voor overstromingsgebied 5 oost en west zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 6-7 en Figuur 6-8. Het vereiste binnentalud van de westzijde is relatief steil. Dit wordt veroorzaakt door de hoge stabiliteitsfactor in de huidige situatie. Het profiel moet flink versteild worden om precies te voldoen aan de vereiste stabiliteitsfactor per IPO-klasse.



Figuur 6-7: Instandhoudingsprofiel overstromingsgebied 5 oost



Figuur 6-8: Instandhoudingsprofiel overstromingsgebied 5 west

6.5 Hoogte

Vanwege het ontbreken van terugkeertijden van waterhoogtes kan er geen faalkans worden bepaald voor de doorsneden. Aangezien er tot een faalkans per vak moet worden gekomen, is aan de hand van een ingeschatte decimeringshoogte van 0,30 m de maatgevende waterstand en de daarbij behorende kruinhoogte afgeleid voor de verschillende IPO-classes voor overstromingsgebieden 1-oost, 5-oost en 5-west. Deze decimeringshoogte houdt in dat een 10 keer zo grote terugkeertijd tot een 0,30 m hoger maatgevend hoogwater leidt.

De kering is momenteel overal als IPO-klasse III gedefinieerd. Dit resulteert in de volgende benodigde kruinhoogten per norm per overstromingsgebied. Deze hoogte moet over minstens 1,25 m breedte aanwezig zijn.

Tabel 6-3: Benodigde kruinhoogte per norm voor overstromingsgebied 1-oost

IPO-klasse	I	II	III	IV	V
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03
MHW [m +NAP]	1,2	1,35	1,5	1,65	1,8
Kruinhoogte [m+NAP]	1,5	1,65	1,8	1,95	2,1

Tabel 6-4: Benodigde kruinhoogte per norm voor overstromingsgebied 5-oost en 5-west (zuid)

IPO-klasse	I	II	III	IV	V
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03
MHW [m +NAP]	3,65	3,80	3,95	4,10	4,25
Kruinhoogte [m+NAP]	3,95	4,10	4,25	4,40	4,55

Tabel 6-5: Benodigde kruinhoogte per norm voor overstromingsgebied 5-west (noord)

IPO-klasse	I	II	III	IV	V
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03
MHW [m +NAP]	3,2	3,35	3,5	3,65	3,8
Kruinhoogte [m+NAP]	3,5	3,65	3,8	3,95	4,1

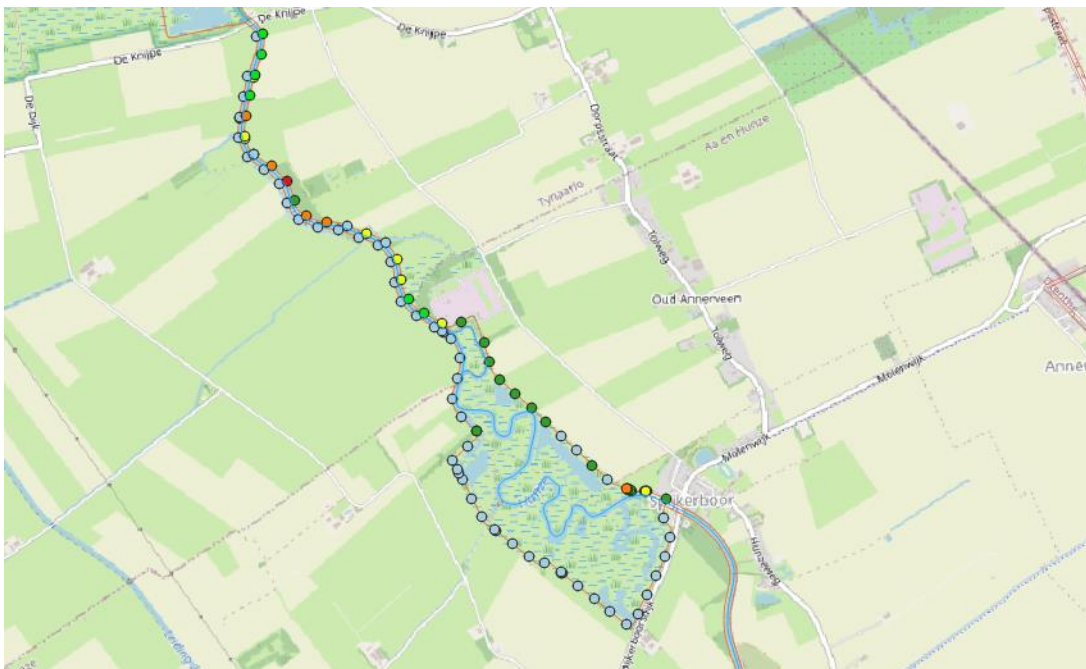
Onderstaande figuren tonen de beoordeling aan van de doorsneden van overstromingsgebieden 1-oost, 5-oost en 5-west. De kleuren tonen aan aan welke norm de hoogte voldoet. Deze norm is een overschrijdingskans. Aangezien gerekend dient te worden met een faalkans, wordt de overschrijdingskans gekoppeld aan een faalkans. Hierbij wordt uitgegaan van de standaardverhouding tussen overschrijdingskans en faalkans van 0,20 [2]. Dit is als zodanig opgenomen in Tabel 6-6. De faalkans per doorsnede is vermeld in Figuur 6-9 en Figuur 6-10.

Tabel 6-6 Veiligheidsbenadering d.m.v. instandhoudingsprofiel IPO-classes

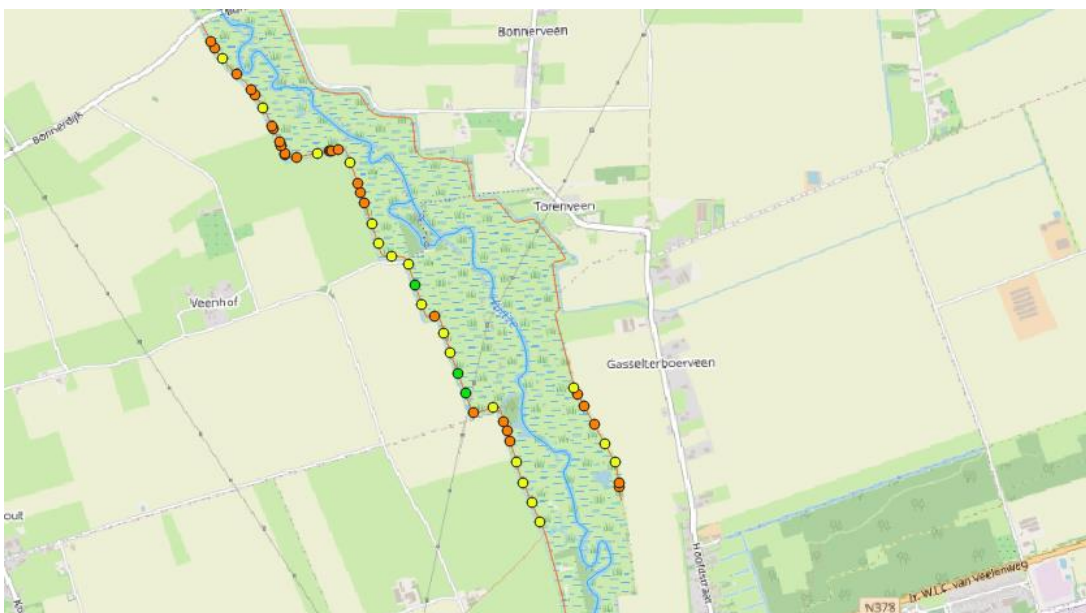
Kleur	Voldoet aan IPO	Jaarlijkse overschrijdingskans	Jaarlijkse faalkans
Rood	I	1/10	1/50
Oranje	II	1/30	1/150
Geel	III	1/100	1/500
Lichtgroen	IV	1/300	1/1500
Donkergroen	V	1/1000	1/5000

Kanttekeningen verhouding overschrijdingskans/faalkans

- Conform de IPO-richtlijn mag de faalkans 20% van de overschrijdingskans bedragen. Keringen in IPO-klasse I, II en III hebben gedurende de afgelopen zestig jaar aangetoond aan deze faalkanseis te voldoen [12].
- In deze pilot wordt ervan uitgegaan dat de afgeleide instandhoudingsprofielen voldoen aan de faalkansen uit Tabel 6-6 (dus gebruikmakend van de verhouding van 0,20 tussen overschrijdingskans en overstromingskans), omdat de instandhoudingsprofielen zijn bepaald conform de (schade)factoren uit de LTVRW [2]. Dit betekent dus ook dat de werkwijze alleen mogelijk is met een vastgestelde relatie tussen overschrijdingskans en overstromingskans.



Figuur 6-9 Resultaten hoogtetoets overstroomingsgebied 1: rood: IPO I, oranje: IPO II, geel: IPO III, lichtgroen: IPO IV, donkergroen: IPO V



Figuur 6-10 Resultaten hoogtetoets overstroomingsgebied 5: oranje: IPO II, geel: IPO III, lichtgroen: IPO I. De dijkdelen waar geen 'punten' staan voldoen aan IPO III

6.5.1 Faalkansbenadering overstroomingsgebied

De faalkansen moeten vertaald worden naar een faalkans voor het gehele overstroomingsgebied. In deze pilot wordt niet de gehele trajectfaalkans bepaald, enkel overstroomingsgebied 1-oost en overstroomingsgebied-5.

Indien een hoogwatergolf langskomt is er in het gehele overstromingsgebied circa dezelfde afvoer. Als het op de laagste plek van de kering niet overstromt, zal het ook nergens anders overstromen. Dit betekent dat er geen lengte-effect is voor het toetsspoor Hoogte. De doorsnede met de laagste kruinhoogte heeft de grootste kans op falen en bepaalt de faalkans van het dijkvak/overstromingsgebied. Voor het toetsspoor Hoogte is de faalkans voor een overstromingsgebied daarom gelijk aan de maximale faalkans van een doorsnede binnen het gebied:

$$P_{\text{overstromingsgebied},i}(HT) = \max(p_{\text{doorsnede}})$$

Waarin:

$P_{\text{overstromingsgebied}}$	Faalkans overstromingsgebied i	[-]
$P_{\text{doorsnede}}$	Faalkans doorsnede i	[-]

Deze volledige afhankelijkheid is de beste schatting, onafhankelijkheid meenemen zal pessimistisch zijn. Onderstaande tabel toont de faalkans per overstromingsgebied voor de hoogte.

Tabel 6-7 Inschatting faalkans [1/jaar] Hoogte voor dijkvakken 1-oost, 5-oost en 5-west

Overstromings- gebied	Faalkans [1/jaar]
1 – oost	1/50
5 – oost	1/150
5 – west	1/150

6.6 Faalkansbepaling macrostabiliteit binnenwaarts

De werkwijze om tot een faalkansbepaling te komen voor macrostabiliteit binnenwaarts binnen deze pilot bestaat uit een aantal stappen:

Stap 1: Grof filter - Alle doorsneden met een lagere kerende hoogte dan 1 m worden beoordeeld door de beheerders en krijgen een faalkans toegekend die hoort bij de huidige norm van het traject, dus IPO-klasse III (1/500 jaar faalkans).

Stap 2: Toetsing met instandhoudingsprofiel.

Indien < IPO III:

Stap 3: Semi-probabilistische stabiliteitsberekening (voor deze pilot is dat een stabiliteitsberekening van de vorige toetsing. Voor beoordelingen in de toekomst kan dit ook worden gebruikt, echter dient dan mogelijke degradatie te worden meegenomen).

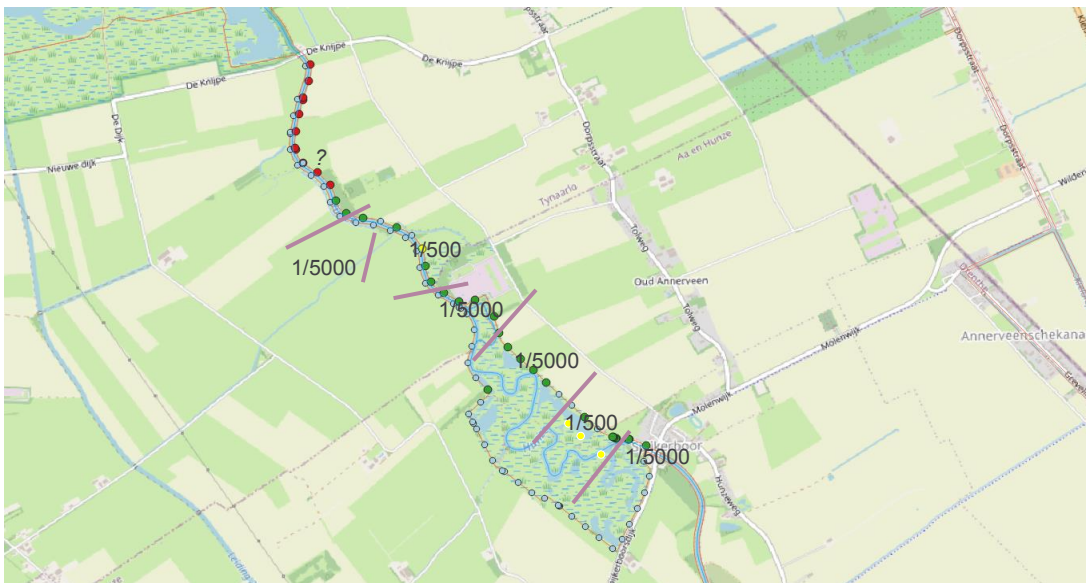
Stap 4: Restbreedte methode.

Stap 1 is gedaan door het waterschap. Van deze doorsneden zijn geen 'bolletjes' zichtbaar in de kaarten. De delen waar geen doorsneden zijn doorgerekend zijn groen belijnd in onderstaande kaarten en er zijn per 50 m bolletjes toegevoegd met een 'witte rand'. Dit is zichtbaar aan de oostzijde van overstromingsgebied 5.

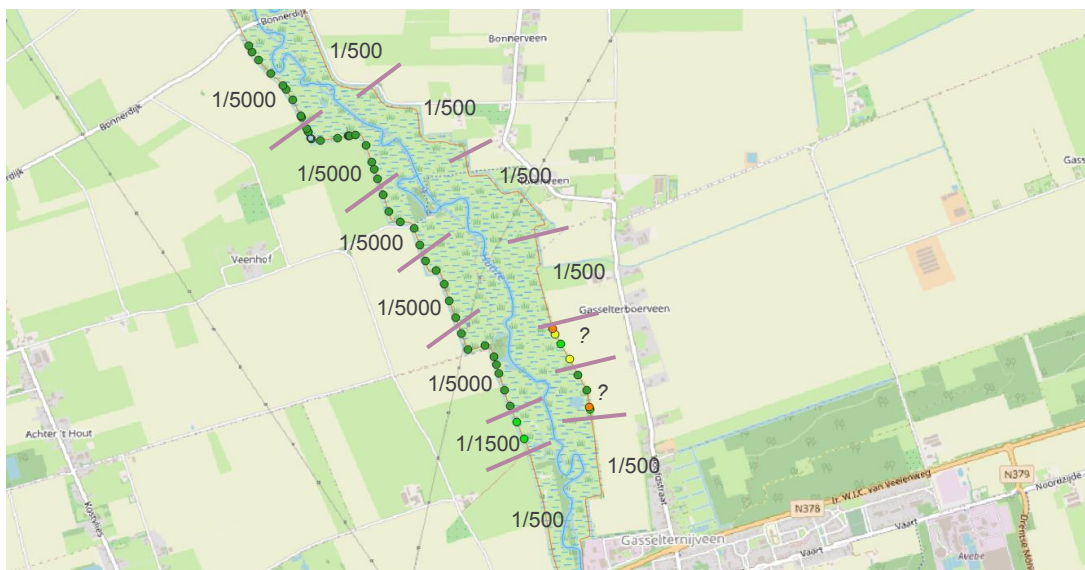
6.6.1 Veiligheidsbenadering met instandhoudingsprofiel

De resultaten met het instandhoudingsprofiel van de keringen in overstromingsgebieden 1 en 5 zijn wisselend. In onderstaande figuren zijn de resultaten zichtbaar. De kleuren geven een bepaalde IPO-klasse aan waaraan de doorsnede voldoet. Deze IPO-klassen zijn gekoppeld aan een jaarlijkse overschrijdingskans, dit moet vertaald worden in een jaarlijkse faalkans. Hierbij wordt uitgegaan van de standaardverhouding tussen overschrijdingskans en faalkans van 0,20 [2]. Dit is als zodanig opgenomen in Tabel 6-9.

Voor het combineren van de faalkans worden de overstromingsgebieden opgedeeld in dijkvakken. De taludhelling van het binnentalud (en de ondergrond) van de doorsneden in deze dijkvakken zijn ongeveer gelijk aan elkaar. Per dijkvak wordt er één representatief profiel gekozen. Aangenomen wordt dat de bijbehorende faalkans van de representatieve doorsnede gelijk is aan het toetsresultaat voor het vak en dat de faalkans per doorsnede gelijk is aan de faalkans per vak. In het geval van deze pilot waren in principe alle faalkansen van de doorsneden (per 100 m) al bekend, dus was het gemakkelijk om een 'representatieve' faalkans te kiezen.



Figuur 6-11 Resultaten instandhoudingsprofiel overstromingsgebied 1: rood: voldoet niet aan IPO I, geel: voldoet aan IPO III, donkergroen: voldoet aan IPO V.



Figuur 6-12 Resultaten instandhoudingsprofiel overstromingsgebied 5: rood: voldoet niet aan IPO I, oranje: voldoet aan IPO II, geel: voldoet aan IPO III, lichtgroen: voldoet aan IPO IV, donkergroen: voldoet aan IPO V

6.6.2 Aanscherping veiligheidsbenadering semi-probabilistische stabiliteitsanalyse

Alle doorsneden die met de toetsing met het instandhoudingsprofiel uitkwamen op een IPO-klasse lager dan IPO III voldoen niet aan de huidige eis van de kering. Voor deze doorsneden wordt een semi-probabilistische stabiliteitssom gemaakt in D-(Geo)stability. Voor nu worden de stabiliteitssommen van de laatste toetsing van het waterschap gebruikt. Hierbij wordt uitgegaan dat de doorsneden in de tussentijd niet zijn gedegrademd. De stabiliteitssommen zijn uitgevoerd met verschillende ondergrondscenario's en droge en natte omstandigheden. Voor deze pilot is de maatgevende som met de laagste stabiliteitsfactor meegenomen.

Tabel 6-8 Faalkansbenadering aan de hand van semi-probabilistische stabiliteitsanalyses

Vak	Doorsnede	Instandhoudingsprofiel IPO-klasse [-]	Veiligheidsfactor D-Stability [-]	Faalkans [1/jaar]
1-oost	HUNZ_0348_0	< I	0,769	1/9
1-oost	HUNZ_0350_0	< I	1,246	1/1348
1-oost	HUNZ_0352_0	< I	1,403	1/1518
1-oost	HUNZ_0353_2	< I	1,488	1/1610
1-oost	HUNZ_0355_0	< I	1,424	1/1541
1-oost	HUNZ_0358_0	< I	1,027	1/309
1-oost	HUNZ_0360_0	< I	1,357	1/1469
1-oost	HUNZ_0361_2	< I	1,437	1/1555
1-oost	HUNZ_0363_0	< I	1,284	1/1390
1-oost	HUNZ_0365_0	< I	2,632	1/2848
1-oost	HUNZ_0367_0	< I	1,851	1/2003
5-oost	HUNZ_0007_0	II	0,968	1/102
5-oost	HUNZ_0021_0	II	0,985	1/104

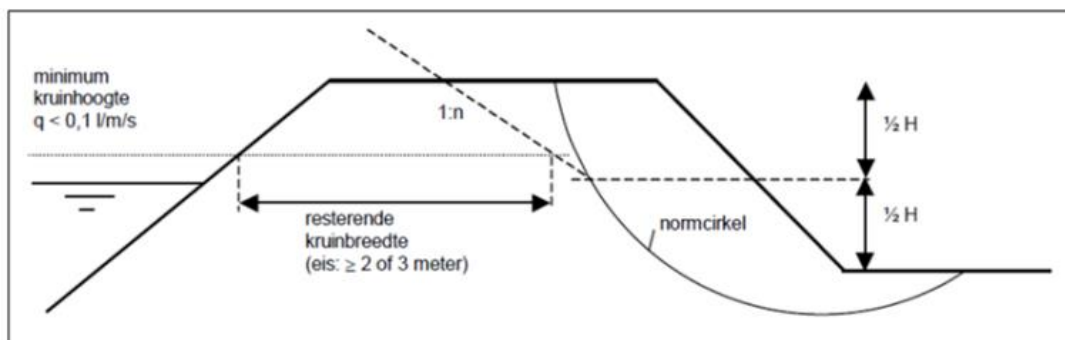
Uit de semi-probabilistische stabiliteitsanalyse volgt dat negen van de dertien doorsneden met de D-Stability som wel voldoen aan de huidige norm van 1/500 jaar. Vier doorsneden in het gebied voldoen hier niet aan. Aangezien de keringen op veel delen langs de Hunze breed zijn, wordt hier nog gekeken naar de restbreedte. Voor de overige doorsneden wordt de faalkans voor de faalkansbepaling van het dijkvak ingevoerd zoals uit de stabiliteitsom is gekomen.

6.6.3 Aanscherping veiligheidsbenadering met restbreedte

Voor de doorsneden die niet voldoen aan de huidige norm wordt gekeken naar de restbreedte na een initiële afschuiving. Voor deze methode worden de glijvlakken gebruikt zoals deze zijn bepaald in de semi-probabilistische berekeningen. Daarnaast wordt de methode voor de restbreedte-bepaling gebruikt conform de LTRVW Bijlage 3, zie Figuur 6-13.

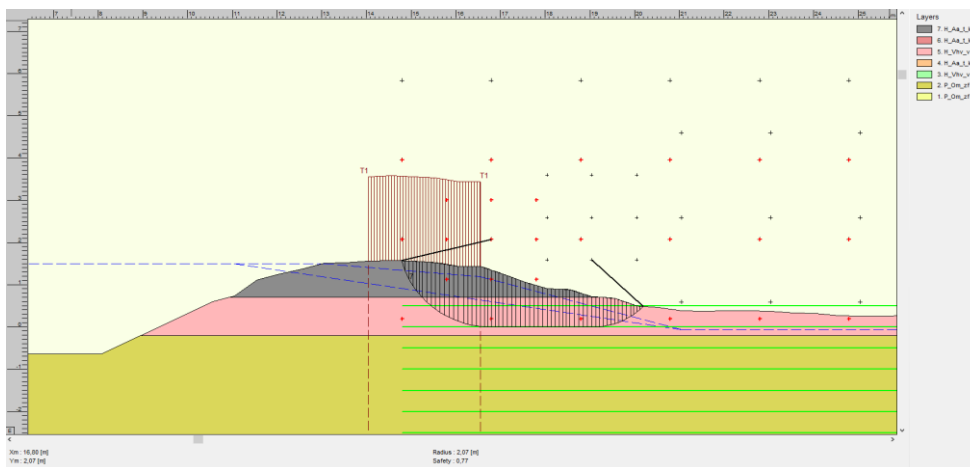
Kanttekeningen restbreedtebenadering

- Deze aanscherping is enkel mogelijk als er kan worden toegestaan dat een gedeelte van het binnentalud mag afschuiven. Als er bijvoorbeeld een weg op de kering ligt zal dit ook moeten meespelen in de vraag of een afschuiving toelaatbaar is.
- De doorsneden worden met de restbreedtebenadering enkel getoetst op de norm (IPO III), waaruit volgt dat de doorsneden voldoen of niet voldoen. Er kan met deze methode dus geen faalkans gegeven worden. Als de doorsnede voldoet is de faalkans sowieso gelijk aan de faalkans horende bij de huidige norm IPO-klasse III, maar dit zou ook hoger kunnen zijn.

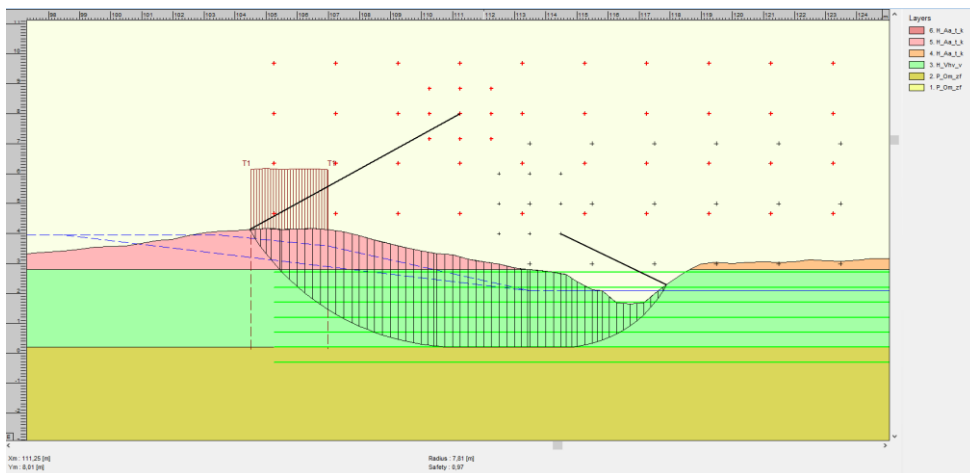


Figuur 6-13 Principeschets restbreedtemethode volgens het TRAS [LTRVW Bijlage 3 figuur 1]

Voor deze pilot wordt de restbreedtebenadering voor twee profielen uitgevoerd (van 5-oost HUNZ_0021_0 en 1-oost HUNZ_0358_0 waren er geen D-Geostability sommen voor handen). Beide doorsneden voldoen niet aan de hoogte. De kering kan daardoor met de restbreedtemethode niet als voldoende worden beoordeeld en blijft daarmee hangen op de faalkans zoals bepaald aan de hand van de semi-probabilistische beoordeling.



Figuur 6-14 D-Geostability som overstromingsgebied 1-oost doorsnede HUNZ_048_0



Figuur 6-15 D-Geostability som overstromingsgebied 5-oost doorsnede HUNZ_0007_0

6.6.4 Faalkansbenadering overstromingsgebied

Voor het noordelijkste dijkvak van overstromingsgebied 1-oost zijn alle faalkansen van de doorsneden bepaald met semi-probabilistische sommen (zie Tabel 6-8). Voor de twee doorsneden waarvoor een faalkans van 1/9 en 1/309 jaar waren uitgerekend is geen restbreedtebenadering gedaan. Er wordt van uitgegaan dat er voldoende restbreedte is en dat de twee doorsneden daarom 'voldoen' aan de faalkans horend bij IPO III. De aanname dat er voldoende restbreedte is geldt ook voor de twee doorsneden in overstromingsgebied 5-oost. Hiermee wordt de faalkans van de twee dijkvakken met een '?' in Figuur 6-12; 1/500 jaar.

De faalkansen per dijkvak voor stabiliteit binnenwaarts moeten vertaald worden naar een faalkans voor het overstromingsgebied. De faalkans van een overstromingsgebied is afhankelijk van de lengte van de dijkvakken en het overstromingsgebied en de (on)afhankelijkheid in belasting en sterkte.

Achtergrond lengte-effect

- Er is geen lengte-effect als de beheerder exact weet waar het mis zal gaan en waar diegene moet inspecteren. In een groter vak kan het op meerdere locaties misgaan, daarom moet de doorsnede-eis strenger zijn om op vakniveau een ontwerp te krijgen dat voldoet aan de eis die is gesteld voor de waterveiligheid.
- Voor de sterkte kan niet zomaar aangenomen worden dat alle dijkvakken binnen een overstromingsgebied afhankelijk zijn. De faalkans van een overstromingsgebied zal immers toenemen naarmate het gebied langer is: de kans op een zwakke(re) plek neemt toe.
- Een leidraad voor primaire keringen waarin het lengte-effect wordt meegenomen is het Assemblageprotocol WBI. Dit protocol schrijft voor dat, voordat er wordt begonnen met het combineren van faalkansen, de STBI-faalkans van het dijkvak moet worden aangepast aan de lengte van het vak met een lengte-effectfactor:

$$N_{\text{overstromingsgebied}} = 1 + \frac{a_l L_{\text{overstromingsgebied}}}{b_l} = 1 + \frac{0,033 * L}{50}$$

Voor deze pilot wordt het lengte-effect echter niet meegenomen aangezien er met het assembleren van faalkansen bottom-up wordt gecombineerd: van doorsnede-niveau naar vakniveau naar het niveau van het overstromingsgebied. Het lengte-effect hoeft dan niet te worden gehanteerd (*als het lengte-effect wél wordt meegenomen voor macrostabiliteit zorgt dit voor circa een 5x hogere faalkans, zowel voor de ondergrens als de bovengrens*).

- Bovenstaande betekent niet dat het lengte-effect er niet is. Uiteindelijk is er binnen een dijkvak met precies dezelfde doorsneden alsnog een verschil in faalkans, bijvoorbeeld door een variatie van de schuifsterkte. Het maakt daarom voor het lengte-effect niet uit hoeveel doorsneden er precies in een vak worden doorgerekend. Er is altijd ergens een zwakste schakel.

Als ondergrens van de faalkans wordt uitgegaan van afhankelijkheid tussen de dijkvakken. De faalkans voor een overstromingsgebied is gelijk aan de maximale faalkans van een dijkvak binnen het gebied:

$$P_{\text{overstromingsgebied},i}(STBI) = \max(p_{\text{vak}})$$

Als bovengrens van de faalkans geldt onafhankelijkheid. Hiervoor is:

$$P_{\text{systeem}} = \sum P_i$$

De faalkans voor een overstromingsgebied is gelijk aan:

$$P_{\text{overstromingsgebied},i}(STBI) = 1 - \left((1 - P_{\text{vak},i})(1 - P_{\text{vak},i+1})(1 - P_{\text{vak},i+2}) \text{ etc} \right)$$

Tabel 6-9 toont de berekende faalkansen, inclusief de semi-probabilistische berekeningen en aanname voor de restbreedtebenadering.

Tabel 6-9 Onder- en bovengrens faalkans [1/jaar] aan de hand van beoordeling instandhoudingsprofiel en semi-probabilistische methode voor dijkvakken 1-oost, 5-oost en 5-west

Dijkvak	Ondergrens faalkans [1/jaar]	Bovengrens faalkans [1/jaar]
1 – oost	1/105	1/70
5 – oost	1/500	1/273
5 – west	1/500	1/72

Opmerking combineren faalkansen

- In eerste instantie was de faalkans voor het overstromingsgebied bepaald door de faalkansen van alle doorsneden (per 100 m) te combineren met elkaar. Voor de dijkdelen waar geen doorsneden waren berekend werd aangenomen dat de doorsneden iedere 100 m voldeden aan IPO III. Echter volgde hieruit dat er een grote afstand ontstond tussen de berekende ondergrens en bovengrens van de faalkansen:

Dijkvak	Ondergrens faalkans [1/jaar]	Bovengrens faalkans [1/jaar]
1 – oost	1/105	1/12
5 – oost	1/500	1/12
5 – west	1/500	1/38

- In overleg is besloten om dijkvakken te maken in een overstromingsgebied met een ‘representatieve’ faalkans. Dit was gemakkelijk te bepalen aangezien van iedere doorsnede de faalkans al was bepaald.

Kanttekeningen

- De IPO-klasse, en dus de bijbehorende faalkans die met instandhoudingsprofiel-berekeningen is bepaald, is enkel berekend bij een waterstand horend bij IPO III, dus met een kans van 1/100 jaar. De faalkansen die worden berekend, zijn dus faalkansen die horen bij een waterstand van 1/100 jaar. In principe zal ook voor alle andere waterstanden een taludsteilheid moeten worden bepaald, horend bij een bepaalde faalkans. Dit is echter niet gedaan in de pilot aangezien er geen waterstandsverloop met terugkeertijden beschikbaar is.

6.7 Faalkansbepaling piping

De werkwijze om tot een faalkansbepaling te komen voor piping binnen deze pilot bestaat uit een aantal stappen:

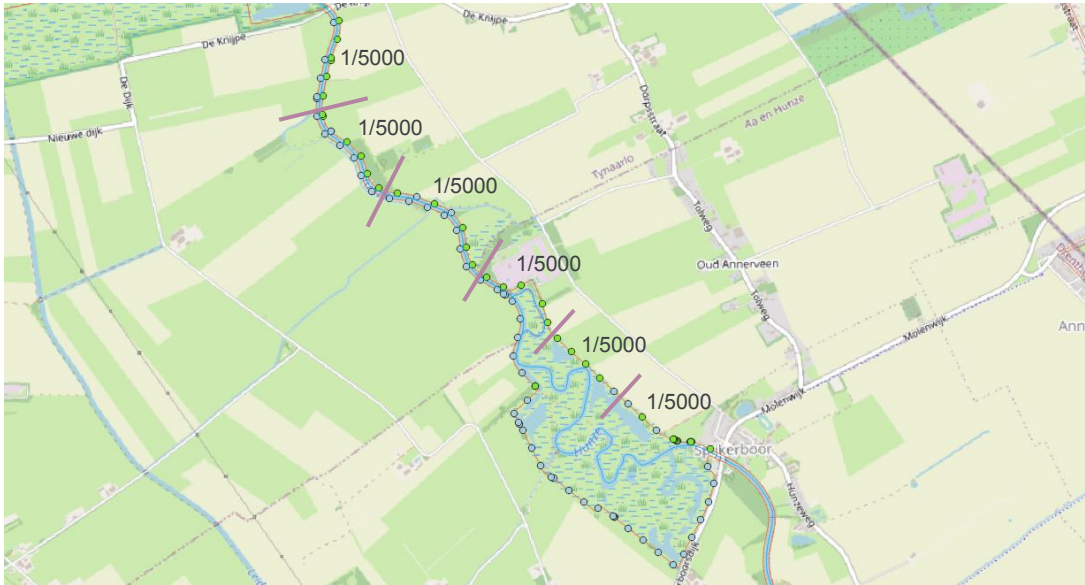
Stap 1: Instandhoudingsprofiel.

Indien < IPO III

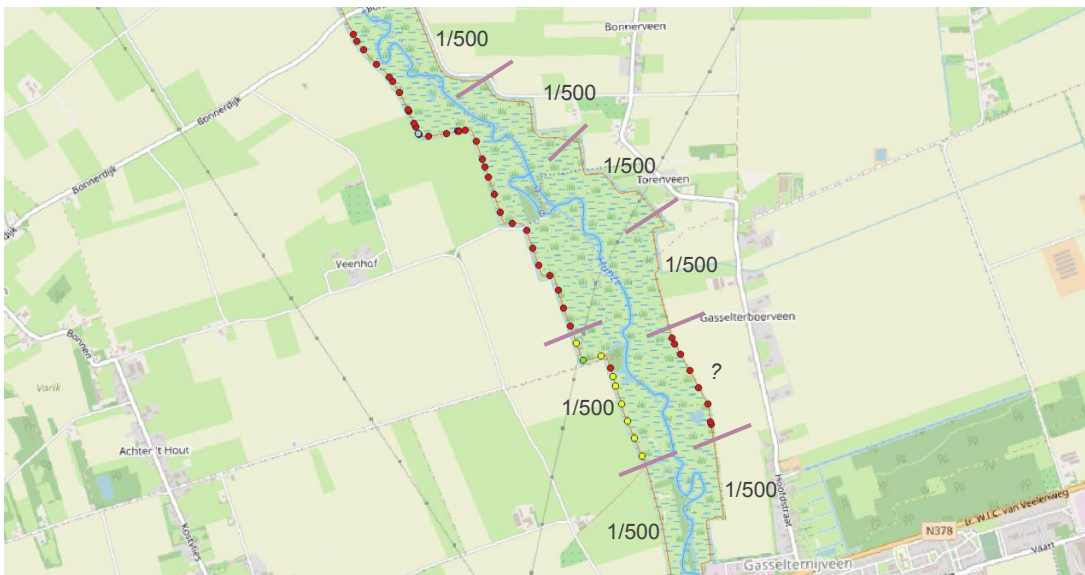
Stap 2: Sellmeijer-berekening maatgevende bodemopbouw vorige toetsing (uit DINOloket).

6.7.1 Faalkansbepaling instandhoudingsprofiel

De resultaten met het instandhoudingsprofiel van de keringen in overstromingsgebieden 1 en 5 zijn wisselend. In onderstaande figuren zijn de resultaten zichtbaar. De kleuren geven een bepaalde IPO-klasse aan waaraan de doorsnede voldoet. De 'groene' doorsneden voldoen aan IPO-klasse V (faalkans 1/5000), de 'gele' aan IPO-klasse III (faalkans 1/500) en de 'rode' doorsneden voldoen niet aan een IPO-klasse conform het instandhoudingsprofiel.



Figuur 6-16 Resultaten instandhoudingsprofiel piping overstromingsgebied 1: groen: voldoet aan IPO V



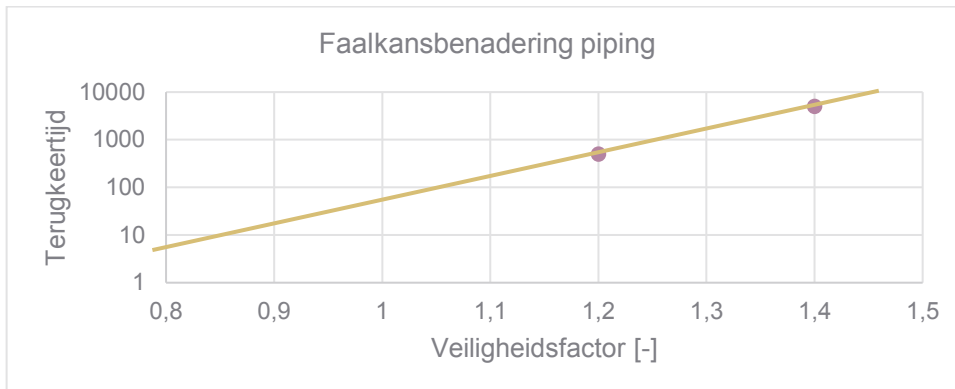
Figuur 6-17 Resultaten instandhoudingsprofiel piping overstromingsgebied 5: rood: voldoet niet aan IPO I, geel: voldoet aan IPO III, groen: voldoet aan IPO V

6.7.2 Aanscherping veiligheidsbenadering met Sellmeijer-berekening

Alle doorsneden die met de toetsing met het instandhoudingsprofiel uitkwamen op een IPO-klasse lager dan IPO III (de 'rode' doorsneden) voldoen niet volgens deze eerste schifting

aan de huidige eis van de kering. Voor deze doorsneden wordt een voor de doorsnede specifieke Sellmeijer-som gemaakt. Hiervoor wordt de maatgevende bodemopbouw gebruikt voor piping, met de hoogste top zand.

Om de faalkans te bepalen is gebruik gemaakt van de relatie uit de LTRVW dat een veiligheidsfactor van 1,2 gelinkt is aan de faalkans horend bij IPO III (1/500 jaar) en 1,4 een faalkans horend bij IPO V (5000 jaar).



Figuur 6-18 Relatie faalkans en veiligheidsfactor voor regionale keringen

Kanttekeningen

- Om de faalkans te bepalen horend bij een veiligheidsfactor wordt normaliter een Gamma-Bèta-relatie gebruikt. Echter is deze relatie voor piping er enkel voor primaire keringen. Voor regionale keringen wordt in de LTRVW enkel de relatie tussen IPO-klasse en veiligheidsfactor beschreven zoals die hierboven staat. Dit is dus een kennisleemte die in een nieuwe veiligheidsbenadering voor regionale keringen zal moeten worden toegevoegd.
- De veiligheidsfactor die met de Sellmeijer-berekeningen is bepaald is enkel berekend bij een waterstand horend bij IPO III, dus met een kans van 1/100 jaar. De faalkansen die worden berekend, zijn dus faalkansen die horen bij een waterstand van 1/100 jaar. In principe moet ook voor alle andere waterstanden een veiligheidsfactor worden bepaald en daarmee een faalkans. Dit is echter niet gedaan in de pilot aangezien er geen waterstandsverloop met terugkeertijden beschikbaar is.

Van alle doorsneden is een faalkans bepaald. Om een faalkans voor het overstromingsgebied te bepalen wordt het gebied eerst in dijkvakken opgedeeld.

In Tabel 6-10 zijn alle doorsneden ingedeeld in een dijkvak, zie daarvoor de kleurvlakken. De faalkans voor het vak is gelijk aan het 'representatieve' profiel.

Tabel 6-10 Faalkansbepaling door middel van Sellmeijer-berekening

Gebied/ Vak	Doorsnede	Top zand [m+NAP]	Polderpeil / MHW [m+NAP]	Kwelweg- lengte [m]	Veiligheids- factor [-]	Faalkans [1/jaar]
5-oost	HUNZ_0006_2	2,3	2,09 / 3,95	19,5	0,83	1/7
5-oost	HUNZ_0007_0	2,3	2,09 / 3,95	23,0	0,93	1/22
5-oost	HUNZ_0009_0	2,3	2,09 / 3,95	29,0	1,10	1/158
5-oost	HUNZ_0011_0	2,3	2,09 / 3,95	31,0	1,15	1/281
5-oost	HUNZ_0014_0	2,3	2,09 / 3,95	28,5	1,08	1/126
5-oost	HUNZ_0018_0	2,3	2,09 / 3,95	24,0	0,96	1/32
5-oost	HUNZ_0019_2	2,3	2,09 / 3,95	23,0	0,93	1/22
5-oost	HUNZ_0021_0	2,3	2,09 / 3,95	27,0	1,04	1/79
5-west-1	HUNZ_0004_0	2,5	2,09 / 3,95	35,0	1,26	1/998
5-west-1	HUNZ_0005_0	2,5	2,09 / 3,95	28,0	1,07	1/112
5-west-1	HUNZ_0008_0	2,5	2,09 / 3,95	32,0	1,18	1/397
5-west-2	HUNZ_0010_0	2,5	2,09 / 3,95	38,0	1,34	1/2506
5-west-2	HUNZ_0012_0	2,5	2,09 / 3,95	39,0	1,37	1/3540
5-west-2	HUNZ_0013_0	2,5	2,09 / 3,95	40,5	1,40	1/5000
5-west-2	HUNZ_0015_0	2,5	2,09 / 3,95	40,0	1,40	1/5000
5-west-2	HUNZ_0016_0	2,5	2,09 / 3,95	40,5	1,40	1/5000
5-west-3	HUNZ_0017_0	2,5	1,70 / 3,80	39,0	1,21	1/561
5-west-3	HUNZ_0020_0	2,5	1,70 / 3,80	36,0	1,14	1/251
5-west-3	HUNZ_0022_0	2,5	1,70 / 3,80	36,0	1,14	1/251
5-west-3	HUNZ_0023_0	2,5	1,70 / 3,80	35,0	1,12	1/199
5-west-3	HUNZ_0024_0	2,5	1,70 / 3,80	35,0	1,12	1/199
5-west-4	HUNZ_0025_0	2,5	1,70 / 3,80	27,0	0,92	1/20
5-west-4	HUNZ_0026_0	2,5	1,70 / 3,80	25,0	0,87	1/11
5-west-4	HUNZ_0027_0	2,5	1,70 / 3,80	34,5	1,11	1/177
5-west-4	HUNZ_0028_0	2,5	1,70 / 3,80	29,5	0,98	1/40
5-west-5	HUNZ_0029_0	2,5	1,33 / 3,7	27,5	0,83	1/7
5-west-5	HUNZ_0030_0	2,5	1,33 / 3,7	25,0	0,78	1/4
5-west-5	HUNZ_0031_0	2,5	1,33 / 3,7	26,0	0,80	1/5
5-west-5	HUNZ_0032_0	2,5	1,33 / 3,7	27,0	0,82	1/6
5-west-5	HUNZ_0033_2	2,5	1,33 / 3,7	28,0	0,84	1/8
5-west-5	HUNZ_0034_0	2,5	1,33 / 3,7	26,5	0,81	1/6
5-west-5	HUNZ_0035_0	2,5	1,33 / 3,7	23,0	0,73	1/3
5-west-5	HUNZ_0036_0	2,5	1,33 / 3,7	30,5	0,89	1/14
5-west-5	HUNZ_0037_2	2,5	1,33 / 3,7	30,5	0,89	1/14
5-west-5	HUNZ_0038_0	2,5	1,33 / 3,7	31,0	0,91	1/18
5-west-5	HUNZ_0039_2	2,5	1,33 / 3,7	30,5	0,89	1/14
5-west-5	HUNZ_0040_2	2,5	1,33 / 3,7	28,0	0,84	1/8
5-west-6	HUNZ_0041_2	2,5	1,33 / 3,5	34,0	0,97	1/35
5-west-6	HUNZ_0043_0	2,5	1,33 / 3,5	29,0	0,86	1/10
5-west-6	HUNZ_0044_0	2,5	1,33 / 3,5	30,0	0,88	1/13
5-west-6	HUNZ_0046_2	2,5	1,33 / 3,5	37,5	1,04	1/79

Gebied/ Vak	Doorsnede	Top zand [m+NAP]	Polderpeil / MHW [m+NAP]	Kwelweg- lengte [m]	Veiligheids- factor [-]	Faalkans [1/jaar]
5-west-6	HUNZ_0047_2	2,5	1,33 / 3,5	29,0	0,86	1/10
5-west-6	HUNZ_0048_0	2,5	1,33 / 3,5	30,5	0,89	1/14
5-west-6	HUNZ_0049_0	2,5	1,33 / 3,5	36,5	1,02	1/63
5-west-7	HUNZ_0050_2	2,5	1,33 / 3,5	27,5	0,83	1/7
5-west-7	HUNZ_0051_0	2,5	1,33 / 3,5	31,0	0,91	1/18
5-west-7	HUNZ_0053_0	2,5	1,33 / 3,5	33,0	0,95	1/28
5-west-7	HUNZ_0054_0	2,5	1,33 / 3,5	30,0	0,88	1/13
5-west-7	HUNZ_0055_2	2,5	1,33 / 3,5	36,0	1,01	1/56
5-west-7	HUNZ_0056_0	2,5	1,33 / 3,5	32,5	0,94	1/25
5-west-7	HUNZ_0093_0	2,5	1,33 / 3,5	30,0	0,88	1/13

Aan de hand van de dijkvakindeling uit Tabel 6-10 is gekozen voor de volgende faalkansen per vak in overstromingsgebieden 5-oost en 5-west in Tabel 6-11.

Tabel 6-11 Faalkansen per dijkvak (representatief profiel) bepaald aan de hand van berekende faalkansen per doorsnede

Dijkvak	Faalkans vak (jaar)
5-oost	1/22
5-west-1	1/112
5-west-2	1/2506
5-west-3	1/199
5-west-4	1/20
5-west-5	1/5
5-west-6	1/10
5-west-7	1/13

6.7.3 Faalkansbenadering overstromingsgebied

De faalkansen per dijkvak voor piping moeten vertaald worden naar een faalkans voor het overstromingsgebied. Voor overstromingsgebied 5-oost zijn alle faalkansen van de doorsneden bepaald met semi-probabilistische sommen.

Afwijking assemblageprotocol met betrekking tot lengte-effect

- Het Assemblageprotocol WBI schrijft voor dat voordat er wordt begonnen met het combineren van faalkansen, de pipingfaalkans van het dijkvak moet worden aangepast aan de lengte van het vak met een lengte-effectfactor:

$$N_{\text{overstromingsgebied}} = 1 + \frac{a_l L_{\text{overstromingsgebied}}}{b_l} = 1 + \frac{0,4 * L}{300}$$

- Voor deze pilot wordt het lengte-effect echter niet meegenomen aangezien er met het assembleren van faalkansen bottom-up wordt gecombineerd. Van doorsnede-niveau naar vakniveau naar het niveau van het overstromingsgebied. Het lengte-effect hoeft dan niet te worden gehanteerd (*als het lengte-effect wél wordt meegenomen voor macrostabiliteit zorgt dit voor circa een 5x hogere faalkans, zowel voor de ondergrens als de bovengrens*).

Als ondergrens van de faalkans wordt uitgegaan van afhankelijkheid tussen de dijkvakken. De faalkans voor een overstromingsgebied is gelijk aan de maximale faalkans van een dijkvak binnen het gebied:

$$P_{\text{overstromingsgebied},i}(\text{STPH}) = \max(p_{\text{vak}})$$

Als bovengrens van de faalkans geldt onafhankelijkheid. Hiervoor is:

$$P_{\text{systeem}} = \sum_i P_i$$

De faalkans voor een overstromingsgebied is gelijk aan:

$$P_{\text{overstromingsgebied},i}(\text{STPH}) = 1 - \left((1 - P_{\text{vak},i})(1 - P_{\text{vak},i+1})(1 - P_{\text{vak},i+2}) \text{ etc} \right)$$

Onderstaande tabel toont de berekende faalkansen van de beoordeling met het instandhoudingsprofiel en de lokale Sellmeijer-som. De doorsneden die zijn beoordeeld met het beheerdersoordeel krijgen een faalkans horend bij IPO III toegekend (1/500 jaar).

Tabel 6-12 Onder- en bovengrens faalkans [1/jaar] piping per dijkvak

Dijkvak	Ondergrens faalkans [1/jaar]	Bovengrens faalkans [1/jaar]
1 – oost	1/5000	1/834
5 – oost	1/22	1/18
5 – west	1/5	1/3

Opmerking

- Aangezien er in dijkvak 5-oost en 5-west doorsneden met faalkansen zijn berekend van rond de 1/10 jaar maakt het niet uit of er een boven- of ondergrens faalkans wordt aangehouden, de faalkans van het traject blijft hoe dan ook veel te klein. Dit betekent dat er een serieus veiligheidsprobleem is of dat de achterliggende berekening te conservatief is ingestoken. In deze pilot is de slechtste bodemopbouw en geometrie gebruikt voor het bepalen van de veiligheidsfactor, mogelijk is deze opbouw in werkelijkheid gunstiger, waardoor de faalkans op piping een stuk lager is.

6.8 Gecombineerde faalkans overstromingsgebied

Om de faalkans per overstromingsgebied te bepalen moeten de faalkansen van stabiliteit binnenwaarts (STBI), hoogte (HT) en piping (STPH) voor het desbetreffende overstromingsgebied met elkaar worden gecombineerd tot één faalkans. Aangezien in deze pilot, maar voor drie van de tien 'overstromingsgebieden' (oost en west) faalkansen zijn bepaald kan er geen toetsoordeel voor het dijktraject worden bepaald. Daarom wordt in deze paragraaf enkel het gecombineerde toetsoordeel van het overstromingsgebied bepaald.

Assembleren kan door afhankelijkheid of onafhankelijkheid aan te nemen. Dit zijn twee uitersten, de daadwerkelijke faalkans zal hier ergens tussenin liggen. De dijkvakken die zijn gebruikt voor het bepalen van de faalkans van het gebied voor de sporen piping en stabiliteit zijn niet gelijk aan elkaar. Hierdoor kunnen de twee berekende faalkansen in de vakken niet één-op-één gecombineerd worden. Wat daarop volgt is dat de sporen afhankelijk van elkaar zijn binnen een overstromingsgebied.

Hiervoor geldt dat er gecombineerd wordt volgens het principe van 'het toetsspoor met de slechtste score is leidend'. Dit leidt tot de volgende onder- en bovengrenzen per dijkvak van de gecombineerde faalkans:

Tabel 6-13 Ondergrens gecombineerde faalkans overstromingsgebieden 1-oost, 5-oost en 5-west

Dijkvak	HT faalkans [1/jaar]	STBI Ondergrens faalkans [1/jaar]	STPH Ondergrens faalkans [1/jaar]	Gecombineerde faalkans [1/jaar]
1 – oost	1/50	1/105	1/5000	1/50 (HT)
5 – oost	1/150	1/500	1/22	1/22 (STPH)
5 – west	1/150	1/500	1/5	1/5 (STPH)

Tabel 6-14 Bovengrens gecombineerde faalkans overstromingsgebieden 1-oost, 5-oost en 5-west

Dijkvak	HT faalkans [1/jaar]	STBI Bovengrens faalkans [1/jaar]	STPH Bovengrens faalkans [1/jaar]	Gecombineerde faalkans [1/jaar]
1 – oost	1/50	1/70	1/834	1/50 (HT)
5 – oost	1/150	1/273	1/18	1/18 (STPH)
5 – west	1/150	1/72	1/3	1/3 (STPH)

Kanttekening

- De bovengrens faalkans is afhankelijk van het aantal gehanteerde vakken/doorsnedes, dus de bovengrens van de faalkans is redelijk willekeurig. Als je op deze manier een gecombineerde faalkans wilt bepalen is dat met instandhoudingsprofielen dus een kennisleemte. In DAM, een programma dat veel voor regionale keringen wordt gebruikt, worden ook veel profielen doorgerekend. Als daarmee een faalkans uit moet worden berekend geldt dezelfde kwestie.

6.9 Conclusie

De stabiliteit heeft ten opzichte van de sporen hoogte en piping de laagste faalkans in de vakken. Piping is het maatgevende mechanisme (hoogste faalkans) voor twee van de drie overstromingsgebieden en daarom het meest bepalend voor de faalkans. Conservatieve keuzes kunnen er nu toe geleid hebben dat de faalkans sterk overschat wordt.

Als er een zuivere faalkans moet worden berekend horend bij een bepaalde waterstand moeten er terugkeertijden van waterstanden beschikbaar zijn. De faalkans van de hoogte is nu bepaald op basis van een decimeringshoogte van 0,30 m. Voor faalkansbepalingen, ook van de andere mechanismen (piping en stabiliteit) is dit eigenlijk een té grote aanname die voor een echte toetsing niet zomaar zou moeten worden gebruikt.

7 Kosten-batenanalyse

7.1 Scope

- Doel: afleiden risico waarbij overstromingsrisico en investeringskosten minimaal zijn.
- Te beschouwen: kans en gevolgen, investeringskosten dijkverbetering.

7.2 Kosten dijkversterking

In dit hoofdstuk worden de optimale ontwerp- en toetsnorm afgeleid. Met de norm wordt in dit geval de vereiste faalkans bedoeld, niet de overschrijdingskans. De optimale ontwerpnorm is de faalkans waarbij de som van de investering voor dijkverbetering (kosten) en het restrisico op overstroming (baten) minimaal is, gegeven dat er versterkt moet worden.

De optimale toetsnorm is de faalkans waarbij de baten van versterking (verlaging van het restrisico) opwegen tegen de totale versterkingskosten, oftewel de norm waar bij overschrijding van deze vereiste faalkans het loont om te gaan versterken.

De optimale ontwerp- en toetsnorm worden uitgewerkt voor het dijkvak 'Overstromingsgebied 1 Oost', oftewel de kering langs de oostzijde van de Hunze in Overstromingsgebied 1, zoals gedefinieerd in Figuur 3-6.

De kosten van dijkversterking zijn gerelateerd aan het benodigde profiel voor het garanderen van een bepaalde betrouwbaarheid. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de instandhoudingsprofielen zoals deze in paragraaf 6.4.1 zijn afgeleid voor 'Overstromingsgebied 1 Oost'. Een hogere betrouwbaarheid leidt tot een groter benodigd profiel en daardoor hogere investeringskosten.

7.2.1 Norm en waterstanden

Voor het opstellen van de curve om de optimale ontwerp- en toetsnorm af te leiden wordt gekeken naar het risico en de investeringskosten voor een norm van 1/10 jaar tot 1/10.000 jaar. De kering is momenteel als IPO klasse III gedefinieerd met een maatgevend hoogwater van NAP +1,5 m. Overige waterstandstatistiek is niet bekend.

De decimeringshoogte wordt ingeschat op 0,30 m, wat inhoudt dat een tien keer zo grote terugkeertijd tot een 0,30 m hoger maatgevend hoogwater leidt. Dit resulteert in de volgende maatgevende waterstanden per norm.

Tabel 7-1: Maatgevende waterstanden per norm

IPO-klasse	I	II	III	IV	V		
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03	3,3E-04	1,0E-04
MHW [m +NAP]	1,2	1,35	1,5	1,65	1,8	1,95	2,1

7.2.2 Profielen per norm

Voor 1/10 jaar (IPO-klasse I) tot 1/1.000 jaar (IPO-klasse V) kan gebruik gemaakt worden van de afgeleide instandhoudingsprofielen. Verder worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Het buitentalud is normonafhankelijk en heeft in alle gevallen een taludhelling van 1:1,5.
- De kruinbreedte is normonafhankelijk en is in alle gevallen 3 m. De minimale kruinbreedte voor deze kering is vanuit het waterschap 1,25 m; dit zal echter niet de kruinbreedte zijn die bij een versterking wordt gehanteerd.
- De benodigde kruinhoogte is 0,30 m hoger dan het maatgevend hoogwater.
- De benodigde binnentaludhelling voor 1/3.000 jaar en 1/10.000 jaar is ingeschat op basis van de trend in benodigde binnentaludhelling van de instandhoudingsprofielen.

Dit leidt tot de benodigde profielen in Tabel 7-2, in termen van breedte van de dijkbasis, oppervlakte van de dwarsdoorsnede en oppervlakte van het maaiveld van de dijk.

Tabel 7-2: Benodigde profielen

	IPO-klasse	I	II	III	IV	V		
Norm [terugkeertijd]		10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
Norm [-]		1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03	3,3E-04	1,0E-04
Instandhoudingsprofiel								
Buitentalud helling [-]		0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Kruinbreedte [m]		3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Kruinhoogte [m +NAP]		1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40
Binnentalud helling [-]		0,26	0,24	0,23	0,22	0,20	0,19	0,17
Berekende parameters								
Breedte dijk [m]		11,08	12,26	13,50	14,93	16,69	18,22	20,72
Oppervlakte doorsnede [m ²]		10,56	12,59	14,85	17,48	20,67	23,87	28,46
Oppervlak maaiveld dijk		11,73	12,96	14,25	15,73	17,53	19,11	21,65

7.2.3 Kosten dijkversterking

Onder kosten van de dijkversterking worden de initiële aanlegkosten en de kosten voor periodiek onderhoud geschaard. Voor de dijkversterking wordt uitgegaan van een versterking in grond, waarbij constructieve elementen niet nodig zijn.

Aanlegkosten

Voor kentallen van de aanlegkosten wordt gebruik gemaakt van het rapport 'Kostenraming verhoogde kadenormen Eemskanaal-Dollardboezem' (2013) [11]. De in dit rapport genoemde kentallen zijn verhoogd met 2% per jaar, gedurende de afgelopen negen jaar.

De aanlegkosten bestaan uit de volgende posten:

- Grondaankoop ter verbreding van het profiel. Kosten van € 7,50/m² voor agrarische grond.
- Taludvoorbewerking (maaien, frezen, grondafoer). Kosten € 3,75/m².
- Grondaanvulling tot benodigde profiel. Kosten € 23,35/m².
- Taludafwerking (inzaaien). Kosten € 0,60/m².
- Bijkomende kosten (engineering, bouwplaatskosten, winst- en risico-opslag). Geschat op 30% van de uitvoeringskosten.

Er is momenteel al een grondlichaam aanwezig. De aannahme wordt gedaan dat voor het op orde brengen van het minimale profiel (behorend bij 1/10 jaar) netto geen grondaanvulling nodig is, maar dat dit bestaat uit het voorbereiden, profileren en opnieuw inzaaien van het talud. Tevens wordt de aannahme gedaan dat het voorbereiden van het talud voor alle normen gelijk is, aangezien dit immers bestaat uit het voorbereiden van het nu aanwezige minimale profiel.

Voor de aanlegkosten van de strengere normen (dus grotere profielen) wordt de extra benodigde grondaankoop en kleiaanvulling berekend ten opzichte van het minimale profiel. De aanlegkosten worden gemaakt in jaar 1.

Kanttekening ontwerpprofiel

De huidige kering van de Hunze is al zeer breed. Mogelijk zijn grondaankoop en grondaanvulling in werkelijkheid bij alle profielen niet nodig. Het zal dan eerder een kwestie zijn van taludverflauwen binnen het aanwezige profiel. Omwille van de simplificatie van het model wordt hieraan voorbij gegaan.

Onderhoud

Onder onderhoud vallen het jaarlijkse reguliere onderhoud (inspectie, handhaving, maaien) en het periodiek grootschalig onderhoud. Voor de inschatting van de kosten zijn de volgende aannames gedaan:

- De kosten van regulier onderhoud zijn ingeschat op € 5/m' (per strekkende meter kering) per jaar.
- Het grootschalig onderhoud wordt ingeschat op eens per dertig jaar. Dit betreft het ophogen van de kruin tot de benodigde hoogte, inclusief frezen en opnieuw inzaaien. Op basis van een recente offerte van de kade van de Oostermoersevaart wordt dit ingeschat op € 30/m'.

De contante waarde van regulier onderhoud voor een oneindige periode wordt bepaald met:

$$CW = \frac{I}{d}$$

Waarin:

<i>CW</i>	<i>Contante Waarde kosten [€/m']</i>
<i>I</i>	<i>Investeringskosten per jaar [€/m']</i>
<i>d</i>	<i>Discontovoet (=0,0225 conform standaard Rijkswaterstaat 2021) [-]</i>

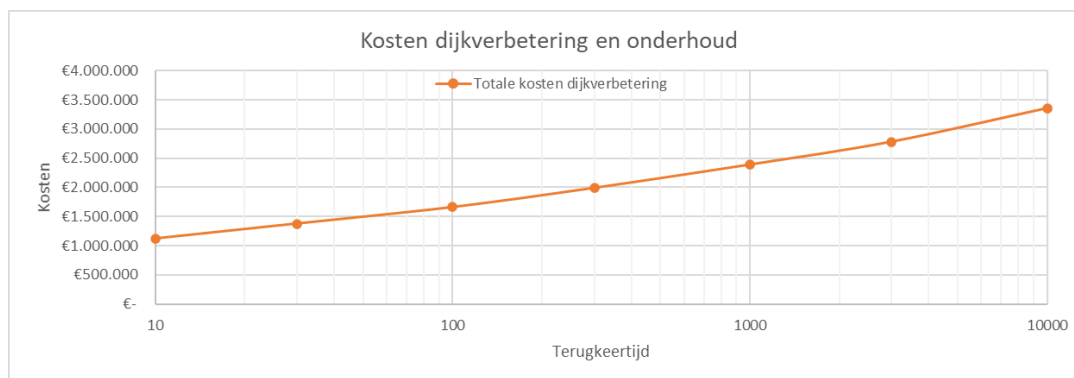
De contante waarde van groot onderhoud elke *T* jaar voor een oneindige periode wordt bepaald met [13]:

$$CW = \frac{\frac{I}{(1+d)^T}}{1 - \frac{1}{(1+d)^T}}$$

Waarin:

<i>CW</i>	<i>Contante Waarde kosten [€/m']</i>
<i>I</i>	<i>Investeringskosten per jaar [€/m']</i>
<i>T</i>	<i>Terugkeertijd van de investering [jaar]</i>
<i>d</i>	<i>Discontovoet (=0,0225 conform standaard Rijkswaterstaat 2021) [-]</i>

Een overzicht van de kosten van dijkverbetering en onderhoud per norm is opgenomen in Tabel 7-3. De curve van de totale kosten is weergegeven in Figuur 7-1.



Figuur 7-1: Curve kosten dijkverbetering en onderhoud

Tabel 7-3: Kosten dijkverbetering en onderhoud

IPO-klasse	I	II	III	IV	V		
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03	3,3E-04	1,0E-04
Grondaankoop							
Grondaankoop [m ²]	0,00	1,18	2,42	3,85	5,60	7,13	9,63
Kosten grond [€/m]	€ -	€ 10,62	€ 21,74	€ 34,62	€ 50,42	€ 64,20	€ 86,70
Aanlegkosten							
Voorbewerking [€/m ² /m]	€ 43,98	€ 43,98	€ 43,98	€ 43,98	€ 43,98	€ 43,98	€ 43,98
Grondaanvulling [€/m ² /m]	€ -	€ 47,40	€ 100,11	€ 161,59	€ 236,05	€ 310,72	€ 417,95
Taludafwerking [€/m ² /m]	€ 7,04	€ 7,78	€ 8,55	€ 9,44	€ 10,52	€ 11,47	€ 12,99
Bijkomende kosten [€/m]	€ 15,31	€ 29,75	€ 45,79	€ 64,50	€ 87,16	€ 109,85	€ 142,48
Totale aanlegkosten [€/m]	€ 66,32	€ 128,90	€ 198,43	€ 279,51	€ 377,71	€ 476,02	€ 617,40
Regulier onderhoud							
Regulier onderhoud [€/m]	€ 5,00	€ 5,00	€ 5,00	€ 5,00	€ 5,00	€ 5,00	€ 5,00
CW onderhoud [€/m]	€ 222,22	€ 222,22	€ 222,22	€ 222,22	€ 222,22	€ 222,22	€ 222,22
Groot onderhoud							
Groot onderhoud [€/m]	€ 30,00	€ 30,00	€ 30,00	€ 30,00	€ 30,00	€ 30,00	€ 30,00
CW groot onderhoud [€/m]	€ 31,60	€ 31,60	€ 31,60	€ 31,60	€ 31,60	€ 31,60	€ 31,60
Totaalkosten							
Lengte dijkvak [m]	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Totale kosten [€]	€ 1.120.505	€ 1.376.685	€ 1.658.968	€ 1.987.835	€ 2.386.845	€ 2.779.131	€ 3.352.726

7.3 Baten dijkversterking

De baten van de dijkversterking zijn uit te drukken in een reductie van het risico, als product van kans op en gevolg van overstroming. Doordat het hier een regionale rivier betreft varieert het maatgevend hoogwater, afhankelijk van de terugkeertijd. Alleen de maatgevende waterstanden voor een 1/100 jaar situatie is bekend. Zoals eerder vermeld wordt uitgegaan van een decimeringshoogte van 0,30 m om de maatgevende waterstanden bij de verschillende terugkeertijden te bepalen.

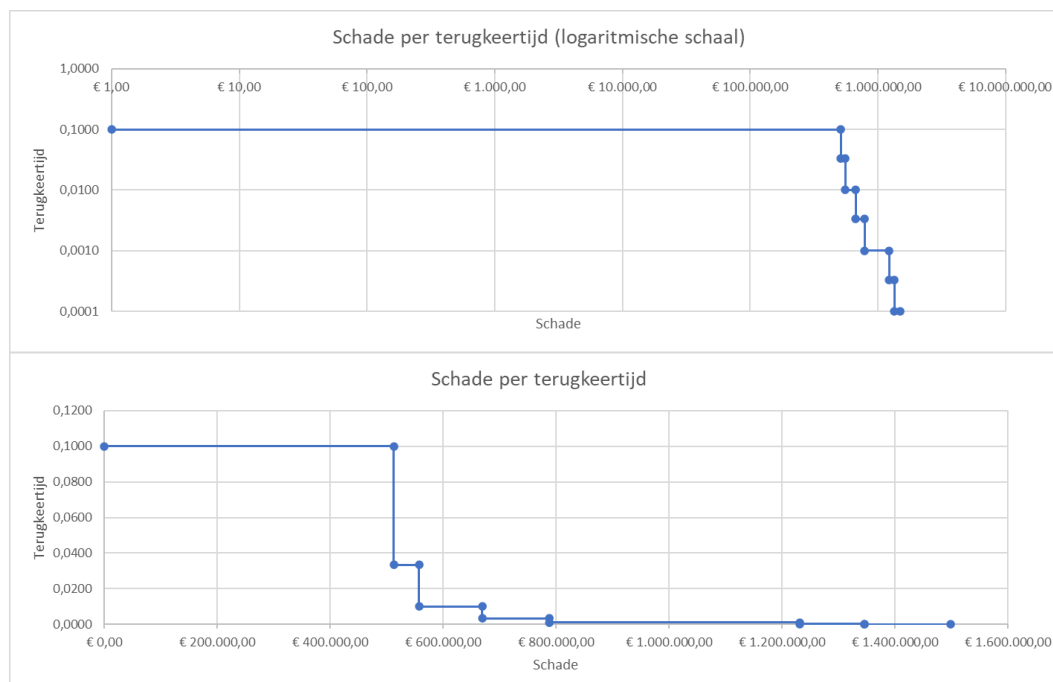
Voor de afzonderlijke hoogwaterstanden is de overstromingsschade bepaald, volgens de werkwijze uit paragraaf 3.4. Vanaf NAP +1,80 m neemt de schade significant toe, aangezien vanaf die waterstand de Dorpsstraat door Zuidlaarderveen overstroomt en een groter deel van het achterland wordt geïnundeerd. De schade per norm is weergegeven in Tabel 7-4.

Tabel 7-4: Schade per norm

	IPO-klasse	I	II	III	IV	V		
Norm [terugkeertijd]		10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
Norm [-]		1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03	3,3E-04	1,0E-04
MHW [m +NAP]		1,2	1,35	1,5	1,65	1,8	1,95	2,1

Afzonderlijke schades [€]	€512.364	€ 557.121	€ 669.148	€ 788.273	€1.231.423	€1.345.238	€1.497.942
---------------------------	----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------

De schade per kans van optreden kan in een FS-curve worden weergegeven. De oppervlakte onder de curve staat gelijk aan het overstromingsrisico. Het overstromingsrisico bij een bepaalde normering kan afgeleid worden door de oppervlakte onder de curve vanaf de betreffende terugkeertijd te bepalen. De FS-curve is weergegeven in Figuur 7-1 op zowel logaritmische schaal als lineaire schaal.

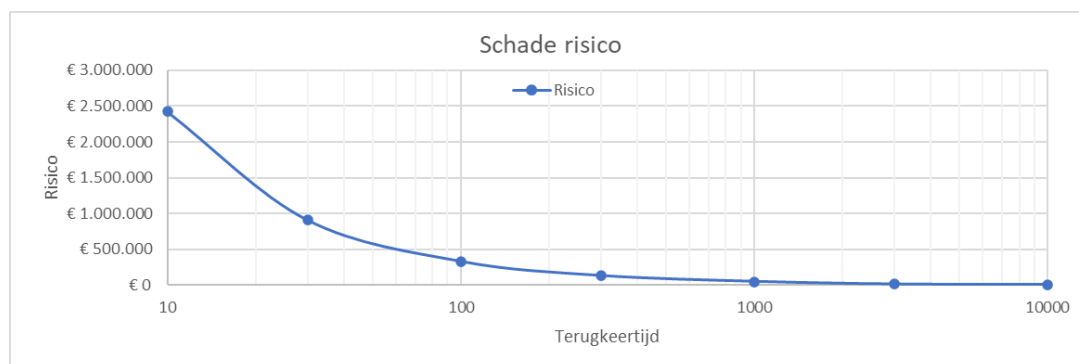


Figuur 7-2: FS-curve, logaritmische schaal (boven) en lineaire schaal (onder)

Een overzicht van de schade en het risico per norm dat hieruit volgt is opgenomen in Tabel 7-5. De curve van het risico is weergegeven in Figuur 7-3. Het risico neemt snel af bij hogere terugkeertijden. Dit is te verklaren doordat de schade maar beperkt toeneemt bij hogere terugkeertijden (€ 0,5 miljoen tot € 1,5 miljoen voor respectievelijk 1/10 jaar en 1/10.000 jaar), terwijl de kans van optreden wel significant afneemt.

Tabel 7-5: Schade en risico per norm

IPO-klasse	I	II	III	IV	V		
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03	3,3E-04	1,0E-04
MHW [m +NAP]	1,2	1,35	1,5	1,65	1,8	1,95	2,1
Afzonderlijke schades [€]	€512.364	€557.121	€669.148	€788.273	€1.231.423	€1.345.238	€1.497.942
Risico - afzonderlijk [€]	€34.158	€12.999	€4.461	€1.839	€821	€314	€15
Risico - gesommeerd [€]	€54.607	€20.450	€7.450	€2.989	€1.150	€329	€150
CW Risico [€]	€2.426.999	€908.884	€331.129	€132.863	€51.116	€14.629	€6.658



Figuur 7-3: Curve risico

7.4 Optimale ontwerpnorm

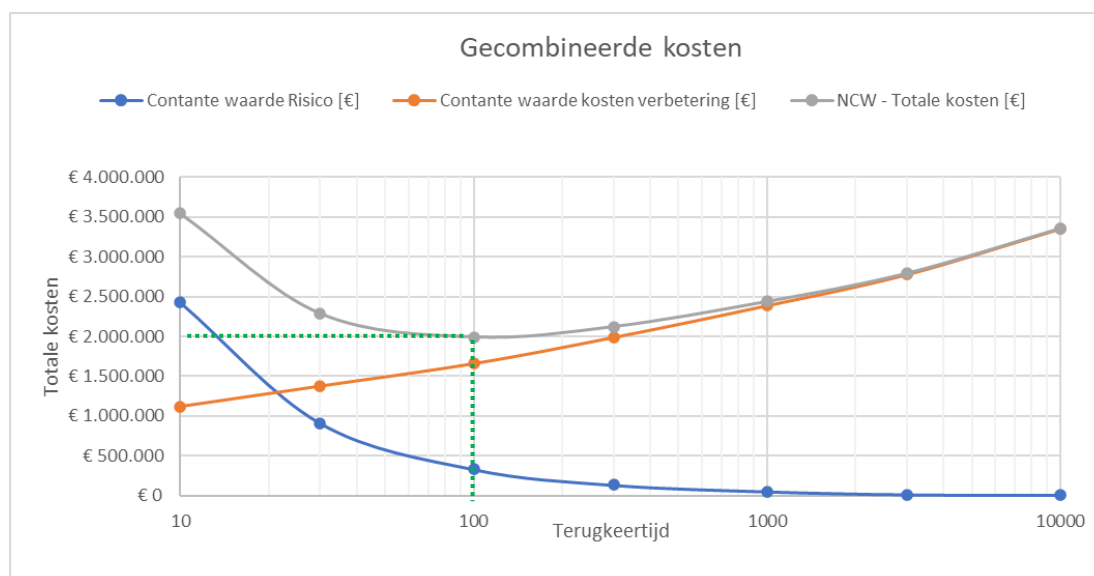
7.4.1 Laagste totale kosten

Om de totale kosten te bepalen worden de kosten van dijkverbetering en het risico per norm bij elkaar opgeteld, zoals opgenomen in Tabel 7-6 en Figuur 7-4 (grijze lijn).

De (economisch) optimale ontwerpnorm hoort bij de laagste totale kosten. Op basis van de berekende punten is de optimale ontwerpnorm 1/100 jaar, de totale kosten (contante waarde) die hierbij horen zijn circa € 2 miljoen.

Tabel 7-6: Gecombineerde kosten per norm

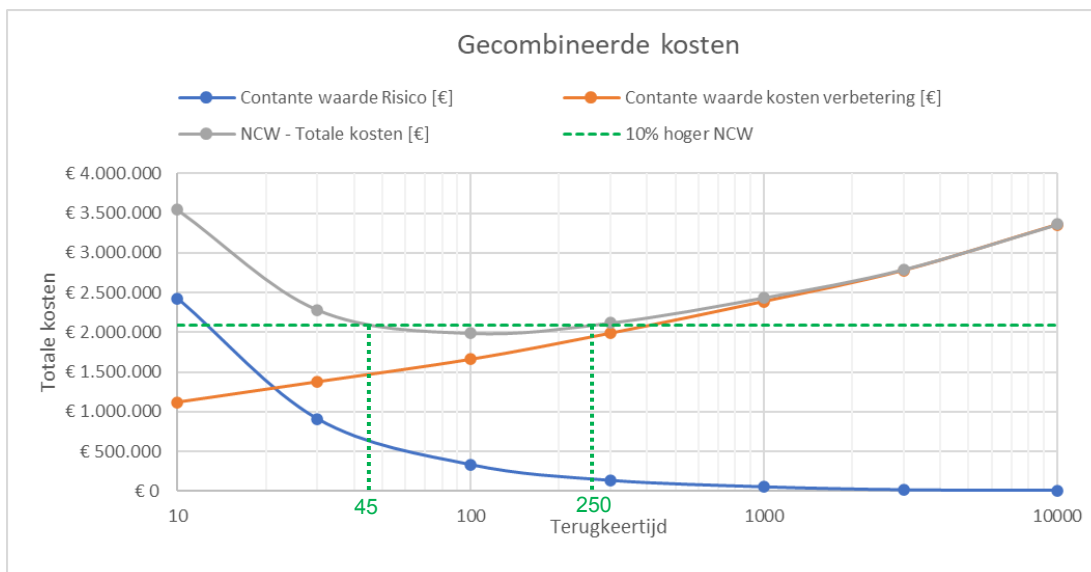
IPO klasse	I	II	III	IV	V		
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03	3,3E-04	1,0E-04
MHW [m +NAP]	1,2	1,35	1,5	1,65	1,8	1,95	2,1
Contante waarde risico [€]	€2.426.999	€908.884	€331.129	€132.863	€51.116	€14.629	€6.658
CW kosten dijkverbetering [€]	€ 1.120.506	€ 1.376.685	€1.658.969	€1.987.835	€2.386.845	€2.779.132	€3.352.727
NCW – Totale kosten [€]	€ 3.547.505	€ 2.285.569	€1.990.098	€2.120.698	€2.437.961	€2.793.761	€3.359.384



Figuur 7-4: Curve risico, kosten en totale kosten

7.4.2 Gevoeligheid optimale ontwerpnorm

De curve van de totale kosten (grijze lijn) loopt relatief vlak ter plaatse van het minimum bij een terugkeertijd van 100 jaar. Om de gevoeligheid te verkennen is een marge van 5% op de totale kosten beschouwd ter plaatse van het minimum. De bandbreedte waarbinnen de optimale ontwerpnorm ligt is 1/45 per jaar en 1/250 per jaar.



Figuur 7-5: Bandbreedte optimale ontwerpnorm

7.5 Optimale toetsnorm

De optimale toetsnorm is de norm waarbij de contante waarde van het overstromingsrisico zo hoog is dat de baten van versterking opwegen tegen de totale versterkingskosten. Oftewel de norm waar bij overschrijding van deze vereiste faalkans het loont om te gaan versterken. De baten van versterking zijn in formulevorm als volgt uit te drukken:

$$B = \frac{(P_0 - P_{nieuw}) * S}{d} = \frac{R_0 - R_{nieuw}}{d}$$

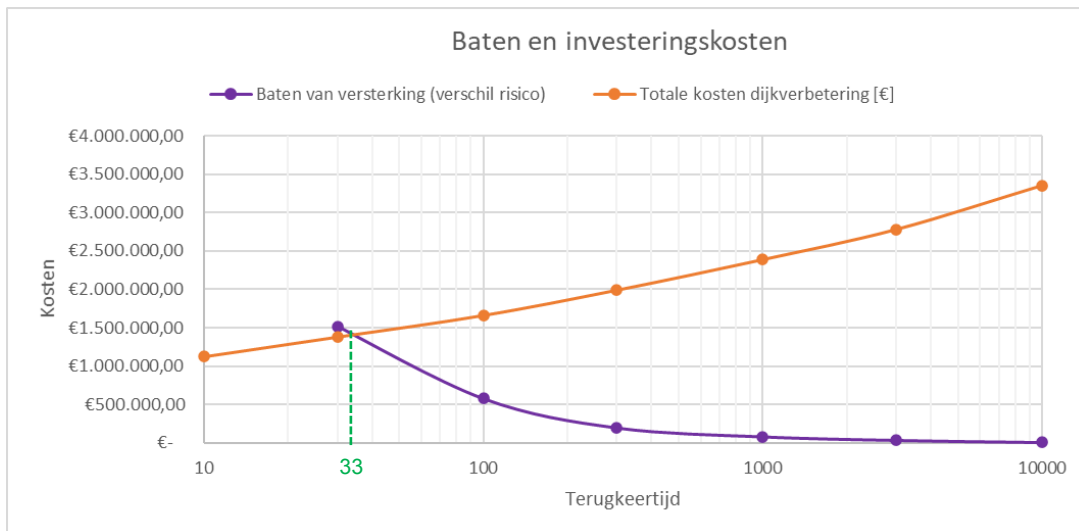
Waarin:

- P_0 Faalkans voor versterken
- P_{nieuw} Faalkans na versterken
- S Schadebedrag overstroming
- R_0 Risico voor versterken
- R_{nieuw} Risico versterken
- d discontovoet

De optimale toetsnorm is de overstromingskans waarbij geldt dat de investeringskosten I gelijk zijn aan de baten van versterking, oftewel $I=B$. In Tabel 7-7 en Figuur 7-6 zijn de baten (als verschil in restrisico tussen opvolgende normen) en de investeringskosten van dijkverbetering weergegeven. Bij het snijpunt van beide curves geldt $I = B$. Deze optimale toetsnorm is af te lezen op circa 1/33 jaar.

Tabel 7-7: Baten en investeringskosten per norm

IPO-klasse	I	II	III	IV	V		
Norm [terugkeertijd]	10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
Norm [-]	1,0E-01	3,3E-02	1,0E-02	3,3E-03	1,0E-03	3,3E-04	1,0E-04
MHW [m +NAP]	1,2	1,35	1,5	1,65	1,8	1,95	2,1
CW baten van versterking [€]	-	€1.518.116	€577.755	€198.266	€81.747	€36.487	€7.972
CW kosten dijkverbetering [€]	€1.120.505	€1.376.685	€1.658.968	€1.987.835	€2.386.845	€2.779.131	€3.352.726



Figuur 7-6: Baten en investeringskosten

7.6 Koppeling met toetsing

De optimale toetsnorm is afgeleid op 1/33 jaar, dit kan worden gezien als de toelaatbare doorbraakkans van de kering. In deze paragraaf wordt verkend wat dit betekent voor het vereiste dijkprofiel (uitgewerkt als instandhoudingsprofiel) en hoe gevoelig de afmetingen van dit profiel zijn voor een andere toelaatbare doorbraakkans en/of andere faalkansverdeling.

7.6.1 Bandbreedtes veiligheid en instandhoudingsprofiel

In Tabel 7-8 is voor verschillende toelaatbare doorbraakkansen en faalkansruimte de vereiste stabiliteitsfactor voor STBI uitgewerkt. Standaard volgens de LTVRW is 80% faalkansruimte voor STBI [2]. Om te komen tot een schadefactor is gebruik gemaakt van de in de LTVRW opgenomen relatie tussen betrouwbaarheid en schadefactor. Om te komen tot een vereiste stabiliteitsfactor is vervolgens vermenigvuldigd met een modelfactor van 1,05 en schematiseringsfactor van 1 (voor het opstellen van het instandhoudingsprofiel wordt immers al de meest ongunstige situatie beschouwd, zoals beschreven in paragraaf 6.3.2).

Tabel 7-8: Vereiste stabiliteitsfactor STBI bij variërende faalkans(verdeling)

Toelaatbare doorbraakkans	1/45		1/100		1/500	
	80%	20%	80%	20%	80%	20%
Faalkansruimte STBI	80%	20%	80%	20%	80%	20%
$P_{eis,STBI}$	2,42E-02	6,06E-03	8,00E-03	2,00E-03	1,60E-03	4,00E-04
$\beta_{T,STBI}$	1,97	2,51	2,41	2,88	2,95	3,35
γ_n	0,74	0,81	0,79	0,85	0,86	0,92
$F_{eis,STBI}$	0,77	0,85	0,83	0,90	0,91	0,96

De vereiste stabiliteitsfactor ligt bij de gekozen variaties tussen de 0,77 en 0,96. Uit paragraaf 6.4 is reeds gebleken dat dit voor het instandhoudingsprofiel voor overstromingsgebied 1 oost een variatie in binnentaludhelling betekent van 1:3,9 tot 1:4,3. Voor overstromingsgebied 5 oost ligt de vereiste taludhelling bij deze vereiste stabiliteitsfactoren tussen de 1:2,6 en 1:4,1; het verschil in ruimtebeslag bedraagt 2 m.

De bandbreedte in benodigd profiel is dus beperkt in het geval van de keringen langs de Hunze.

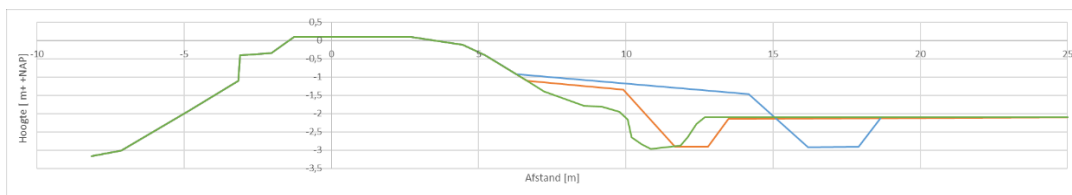
7.6.2 Ander type kering

Om te verkennen of de gevoeligheid voor de norm ook bij andere type keringen laag is, is gekeken naar een schematisering van de Geerkade. De Geerkade is een typische West-Nederlandse boezemkering, gelegen op een dik veenpakket. De huidige stabiliteit is laag en er is gekozen deze te versterken middels en steunberm.

In Figuur 7-7 is in groen de huidige geometrie weergegeven, met links de boezemzijde. De huidige stabiliteitsfactor is 0,81 en zou voldoen aan de toelaatbare doorbraakkans (optimale toetsnorm) van 1/33 jaar. Met een kleine berm (oranje lijn), wordt met een stabiliteitsfactor van 0,83 voldaan aan een doorbraakkans van 1/100 jaar (met 80% faalkansruimte voor macrostabiliteit). Met de grote berm (blauwe lijn), wordt met een stabiliteitsfactor van 0,96 voldaan aan een doorbraakkans van 1/500 jaar (met 20% faalkansruimte voor macrostabiliteit).

Het verschil tussen beide uitersten van de vereiste stabiliteitsfactor betreft circa 5 m aan lengte van de steunberm. Dit betreft zowel extra materiaalgebruik, als ook 5 m aankoop van landbouwgrond, over de gehele lengte van de kadeverbetering.

Deze casus toont aan dat het vereiste profiel wel degelijk gevoelig kan zijn voor de vereiste stabiliteitsfactor.



Figuur 7-7: Dimensionering steunberm Geerkade, oranje lijn is SF=0,83 en blauwe lijn is SF=0,96

8 Samenvatting en conclusies

8.1 Kader

In het kader van de toekomstige besluitvorming over de veiligheidsbenadering voor de regionale keringen werkt STOWA vier pilots uit, elk bestaande uit een aantal onderzoeksvragen. In deze rapportage zijn de onderzoeksvragen voor de pilot “Regionale rivier - landelijk” uitgewerkt. De kering langs de Hunze heeft momenteel een overschrijdingskans van 1/100 jaar.

De vijf onderwerpen die onderzocht zijn in het pilotgebied zijn:

- Schadebepaling. Vergelijking tussen de vigerende aanpak voor normering versus het afleiden van een normering waarbij rekening is gehouden met indirecte gevolgen.
- Maatregelen watersysteem. Invloed van maatregelen op de gevolgen van overstromingen en de normering.
- Medegebruik. Overzicht van eisen aan waterkeringen vanuit medegebruik en inzicht in het mogelijk maatgevend zijn van deze gebruikseisen ten opzichte van de normering.
- Overstromingskans. Daadwerkelijke sterkte van de kering en vertaling naar overstromingskans.
- Kosten-batenanalyse. Afleiden van de toelaatbare faalkans waarbij de som van overstromingsrisico en investeringskosten in dijkverbetering minimaal zijn.

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. De belangrijkste aspecten waar per onderzoeksvraag tegenaan is gelopen worden daarom in dit hoofdstuk benoemd.

8.2 Schadebepaling

- Van de Hunze is geen overstromingsmodel beschikbaar. Voor de onderzoeksvraag is het wel noodzakelijk een inschatting te hebben van een mogelijke overstroming. Om dit te bepalen is in GIS over het hoogtemodel van het achterland (op basis van AHN3) een waterstand getrokken, gelijk aan de rivierwaterstand. Hierbij is de overstroming wel dusdanig gemodelleerd dat de overstroomde gebieden rechtstreeks in contact moeten staan met de rivier. Bij dit versimpelde overstromingsmodel wordt aangenomen dat het waterpeil in de Hunze constant blijft en niet zakt door een breuk of overlopen van de kades.
- Gemiddeld over de overstromingsgebieden bedraagt de overstroming 900 ha. Bij een inundatiediepte van 0,5 m is er een volume van 4,5 mln m³ water nodig om te vullen vanuit de Hunze. Met een debiet van 4 m³/s duurt dit 52 dagen. Het bereiken van dusdanige waterdieptes is daarom niet realistisch. Het bereiken van 0,1 m inundatie duurt al ruim tien dagen. Het gehanteerde overstromingsmodel, en daarmee input voor de Waterschadeschatter, zal daarom leiden tot een overschatting van de economische schades.
- Met behulp van de WaterSchadeSchatter zijn de directe (economische) gevolgen van overstroming in beeld gebracht. Op basis van de objecten in het gebied zijn tevens mogelijke indirecte schades gesignaleerd. Net ten zuiden van het Zuidlaardermeer bevindt zich bijvoorbeeld het NV Waterbedrijf Groningen, waarvandaan het drinkwater getransporteerd wordt naar Groningen.

- Indirecte gevolgen bleken lastig in monetaire waarden uit te drukken. Ondanks dat niet aan ieder onderdeel een bedrag kan worden gegeven wordt geschat dat het totale schadebedrag onder de € 8 miljoen zal blijven, mede doordat met het huidige overstromingsmodel de schades overschat worden. Dit betekent dat de kering op basis van de huidige normering onder IPO-klasse I kan worden geschaard. Het meenemen van indirecte schades leidt voor deze pilot daarom niet tot een andere normering.

8.3 Watersysteem maatregelen

- De volgende maatregelen in het watersysteem zijn gesignaleerd om de gevolgen van overstroming te verkleinen:
 - Compartimenteren van de rivier zal leiden tot verder stijgende waterstanden bovenstrooms van de compartimentering. Compartimentering is alleen kansrijk, als dit water ergens anders in het gebied geborgen kan worden.
 - Ten westen van de Hunze loopt het afwateringskanaal Leiding 2. Het kanaal loopt door minder bebouwd gebied. Tussen Leiding 2 en de Hunze loopt momenteel al een watergang. Bij een kadebreuk benedenstrooms van Nieuw Annerveen zou de afvoer van de Hunze (gedeeltelijk) afgeleid kunnen worden naar Leiding 2.
 - Ten oosten van de Hunze ligt meer bebouwing en zijn de gevolgen van overstroming groter dan bij een overstroming richting het westen. Om bij een (dreigende) doorbraak de toevoer van water naar het oosten te verminderen zou daarom gekeken kunnen worden naar 'decompartimenteren', waarmee feitelijk wordt bedoeld dat een kade aan de westkant wordt doorgestoken.
 - In het huidige overstromingsmodel is er van uitgegaan dat duikers en sifons tussen twee overstromingsgebieden worden dichtgezet in geval van overstroming, om de schade ruimtelijk beperkt te houden. Mogelijk treedt er minder schade op als het water juist wel wordt door gelaten naar lager gelegen gebieden, omdat daardoor de waterdiepten minder oplopen.
- Doordat de kering momenteel al onder IPO-klasse I valt (volgens onderzoeksvraag 1) kunnen maatregelen niet leiden tot een lagere normering. De hierboven genoemde maatregelen zijn in deze rapportage daarom niet nader uitgewerkt.
- Voor alle genoemde maatregelen zal het een bestuurlijke afweging zijn om het te overstroomde gebied te verplaatsen naar andere, minder kwetsbare gelegen gebieden.

8.4 Eisen medegebruik

- Van de eisen voor het medegebruik op de waterkering zijn drie type eisen geconstateerd:
 - *Eisen aan Uiterste grenstoestand (UGT)*. De uiterste grenstoestand is de toestand die samengaat met instortingen of constructieve bezwijking (NEN-EN 1990). Een waterkering wordt ontworpen aan de hand van uitgangspunten die betrekking hebben op de omgeving en eisen die gesteld worden aan de stabiliteit en hoogte. De uiterste grenstoestand is de minimale afmeting in combinatie met de maximale belasting waarvoor de stabiliteit nog voldoende is. Mogelijk heeft het medegebruik een strengere stabiliteitseis dan vanuit waterveiligheid nodig is of wordt er normaliter aan de medegebruikfunctie gerekend met een hogere belasting.
 - *Eisen aan Bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT)*. Een afschuiving hoeft niet direct een bedreiging te vormen voor de waterveiligheid indien er voldoende restbreedte aanwezig is, maar is wel een direct probleem voor bijvoorbeeld een weg op de kering.

De bruikbaarheidsgrenstoestand stelt eisen aan vervormingen, scheurvorming en trillingen. De bruikbaarheidstoestand is de toestand die overeenstemt met voorwaarden waarboven aan de voorgeschreven bruikbaarheidseisen van de constructie niet langer wordt voldaan (NEN-EN 1990). Mogelijk heeft het medegebruik een strengere eis voor vervormingen, scheurvormingen en trillingen dan van vanuit waterveiligheid nodig is.

- *Eisen aan Minimum afmetingen.* De minimum afmetingen voor een object kunnen mogelijk ook maatgevend zijn ten opzichte van de UGT- en BGT-eisen. Een voorbeeld zijn eisen aan bepaalde typen wegen en de breedte van beheerstroken. De benodigde afmetingen van het medegebruik zijn mogelijk maatgevend ten opzichte van de afmetingen van de kering die vanuit waterveiligheid nodig zijn.
- Veel medegebruikobjecten worden ontworpen conform Eurocode. Voor het vergelijken van de betrouwbaarheid van de uiterste grenstoestand conform Eurocode en IPO-normering kan gebruik gemaakt worden van de gemeenschappelijke veiligheidsfilosofie in de vorm van de betrouwbaarheidindex β . Bij een volledig probabilistische benadering zou dit tot dezelfde resultaten moeten leiden.
- Bij een (gangbare) semi-probabilistische benadering moet wel met het volgende rekening worden gehouden:
 - Conform Eurocode wordt vaak gewerkt met een betrouwbaarheid over een referentieperiode van bijvoorbeeld vijftig jaar, waar conform IPO-normering wordt gekeken naar de betrouwbaarheid per jaar.
 - De Eurocode (bijvoorbeeld NEN9997-1 voor grondconstructies) maakt gebruik van andere materiaalfactoren dan de IPO-normering zoals opgenomen in de LTVRW.
 - De IPO-normering zoals opgenomen in de LTVRW maakt gebruik van aanvullende partiële factoren, waar de NEN9997-1 dit niet doet.
 - Het vergelijken van de vereiste betrouwbaarheid tussen Eurocode en IPO-normering is daarmee niet eenvoudig. Door het meenemen van ongunstige partiële factoren, kan het zijn dat zelfs toetsing aan IPO-klasse I in een hogere betrouwbaarheid resulteert dan RC1 volgens de Eurocode. Dat betekent ook dat bijvoorbeeld een wegconstructie op de kering, ontworpen volgens RC1, geen garantie geeft dat de kering waar deze op ligt ook vanuit waterveiligheid voldoende stabiel is.
- Voor leidingen in de kering is geconstateerd dat bij het ontwerp van de leidingen er enkel wordt gekeken naar de eisen van de dijk op de leiding en niet naar de eisen van de leiding op de dijk.

8.5 Overstromingskans

- Voor deze onderzoeksvraag is getracht een methode te gebruiken waarmee met zo min mogelijk inspanning de toetsing kan worden uitgevoerd.
- Voor een bepaald traject (of voor een bepaalde configuratie van een kering) is een minimaal profiel opgesteld dat veilig genoeg is, op basis van de huidige richtlijnen. Een dwarsdoorsnede van de kering langs de Hunze is voldoende betrouwbaar wanneer deze voldoet aan dit instandhoudingsprofiel. Dit profiel moet met beheer en onderhoud in stand worden gehouden.
- Het instandhoudingsprofiel voldoet aan de minimale veiligheidseisen geldend voor de binnenwaartse stabiliteit, de vereiste hoogte aanwezig over de vereiste breedte en de minimale kwelweglengte benodigd om piping niet te doen ontstaan. Dit profiel is bepaald voor alle vijf de IPO-klassen die allemaal een eigen toelaatbare overschrijdingskans (per jaar) hebben. In de pilot is dit door het ontbreken van waterstandsstatistiek echter gedaan voor één waterstand (MHW), horend bij IPO-klasse III. Voor het toetspoot Hoogte is gebruik gemaakt van een decimeringshoogte van 30 cm. Om een vertaling te maken naar de overstromingskans is de doorbraakkans voor boezemkades gesteld op 0,20 keer de overschrijdingskans.

- Alle dwarsdoorsneden langs de Hunze die met de toetsing met het instandhoudingsprofiel uitkwamen op een IPO-klasse lager dan IPO III voldoen niet aan de huidige eis van de kering. Voor deze doorsneden is teruggegrepen op de semi-probabilistische stabiliteitsberekeningen uit de laatste toetsing voor het schatten van de overstromingskans.
- De overstromingskans van de dwarsdoorsneden is vertaald naar een inschatting van de overstromingskans op het niveau van een overstromingsgebied:
 - De doorsneden zijn in eerste instantie gebundeld naar dijkvakken. De faalkans horend bij het representatieve profiel wordt gekozen als faalkans voor het dijkvak.
 - Als ondergrens van de faalkans wordt uitgegaan van afhankelijkheid tussen de dijkvakken. De ondergrens voor een overstromingsgebied is gelijk aan de maximale faalkans van een dijkvak binnen een overstromingsgebied. Voor het toetsspoor Hoogte is dit de beste inschatting.
 - Als bovengrens van de faalkans wordt uitgegaan van onafhankelijkheid tussen de dijkvakken. Deze faalkans voor een overstromingsgebied is gelijk aan het product van de (dijkvak)faalkansen binnen een overstromingsgebied ($1 - (1 - P_{dijkvak})^n$).
 - De faalkansen van de drie toetssporen hoogte (HT), piping (STPH) en macrostabiliteit (STBI) zijn per vak gecombineerd tot één faalkans. In deze pilot wordt er geen lengte-effect meegenomen. De gecombineerde faalkans van een overstromingsgebied is gelijk aan de maximale faalkans van een van de toetssporen.

8.6 Kosten-batenanalyse

- Zowel een (economisch) optimale ontwerp- als toetsnorm zijn afgeleid. De optimale ontwerpnorm is de norm waarbij de som van de investering voor dijkverbetering (kosten) en het restrisico op overstroming (baten) minimaal is. De optimale toetsnorm is de norm waarbij de het overstromingsrisico zo hoog is dat de baten van versterking opwegen tegen de totale versterkingskosten.
- Voor de optimale ontwerpnorm is als volgt te werk gegaan:
 - De kosten van dijkversterking zijn gerelateerd aan het benodigde profiel voor het garanderen van een bepaalde betrouwbaarheid. Hiervoor is gebruik gemaakt van de opgestelde instandhoudingsprofielen. Een hogere betrouwbaarheid leidt tot een groter benodigd profiel en daardoor hogere investeringskosten.
 - De baten van de dijkversterking zijn uit te drukken in een reductie van het risico, als product van kans op en gevolg van overstroming. Doordat het hier een regionale rivier betreft varieert het maatgevend hoogwater, afhankelijk van de terugkeertijd. Alleen de maatgevende waterstand voor een 1/100 jaar situatie is bekend, daarom is uitgegaan van een decimeringshoogte van 0,30 m om de maatgevende waterstanden bij de verschillende terugkeertijden te bepalen. Voor de afzonderlijke hoogwaterstanden is de overstromingsschade bepaald met behulp van de WaterSchadeSchatter. Voor het risico per norm is een FS-curve opgesteld met schade per terugkeertijd, waarbij de oppervlakte onder de grafiek het risico voorstelt.
 - Om de totale kosten te bepalen worden de kosten van dijkverbetering en het risico per norm bij elkaar opgeteld. De (economisch) optimale ontwerpnorm hoort bij de laagste totale kosten. In dit geval is dit bij een norm van 1/100 jaar.
- Voor de optimale toetsnorm is als volgt te werk gegaan:
 - De optimale toetsnorm is de overstromingskans waarbij geldt dat de investeringskosten I gelijk zijn aan de baten van versterking B .
 - De baten zijn bepaald als verschil in restrisico tussen opvolgende normen. De investeringskosten waren al afgeleid voor het bepalen van de ontwerpnorm. De baten en investeringskosten zijn als twee curves weer te geven, bij het snijpunt van beide curves geldt $I = B$.

- De optimale toetsnorm is af te lezen op circa 1/33 jaar. Zodra de faalkans groter is dan deze optimale toetsnorm loont het om te gaan versterken.
- Er is verkend wat de optimale norm betekent voor het vereiste instandhoudingsprofiel en hoe gevoelig dit is voor een andere toelaatbare doorbraakkans en/of faalkansverdeling. Voor de pilot "Regionale rivier - landelijk" is de gevoeligheid beperkt, een andere praktijkcasus (Geerkade) toont aan dat sommige keringen wel gevoelig zijn voor relatief kleine verschillen in vereiste stabiliteitsfactor.

9 Beschouwingen en aanbevelingen

Naar aanleiding van de pilot worden in dit hoofdstuk door de schrijvers enkele beschouwingen en aanbevelingen meegegeven omtrent de keuze voor een nieuwe normering, veiligheidsbenadering en/of toetsing. De beschouwing en aanbevelingen worden per behandeld onderwerp benoemd.

9.1 Schades

Indirecte schades zijn voor de pilot “Regionale rivier - landelijk” niet bepalend voor de normering gebleken. Desondanks is het wat ons betreft altijd zinvol om naast de directe schades de indirecte schades te inventariseren. Daarbij lijkt het ons ook niet noodzakelijk om elke schadepost in geld te willen uitdrukken. Het inventariseren van mogelijke gevolgen (kwalitatief) kan al bijdragen aan de besluitvorming omtrent de gewenste veiligheid.

9.2 Maatregelen watersysteem

Maatregelen in het watersysteem waren voor de pilot “Regionale rivier - landelijk” minder relevant, gezien de beperkte gevolgen van overstroming. Specifieke aanbevelingen kunnen we op dit onderwerp niet geven.

Indien maatregelen in het watersysteem gebruikt worden om tot een minder zware norm te komen, is het van belang de betrouwbaarheid van bepaalde maatregelen goed af te wegen. Dit zit zowel in de technische betrouwbaarheid van maatregelen als de menselijke kant. Met het laatste wordt bedoeld zowel het over durven gaan tot schadebeperkende maatregelen (misschien ten koste van andere belangen) als het daadwerkelijk uitrollen van (fysieke) maatregelen.

9.3 Medegebruik

Uit de pilot blijkt dat het lastig te concluderen is of medegebruik iets zegt over de betrouwbaarheid van de kering en vice versa. Dit komt door de verschillende normen en richtlijnen die hiervoor worden gebruikt: veelal Eurocode versus waterkeringrichtlijnen. Theoretisch is de technische betrouwbaarheid van objecten via de gemene deler β één-op-één te vergelijken. Doordat de veiligheidsfilosofie in de verschillende richtlijnen vervolgens anders wordt uitgewerkt is dit niet zo makkelijk als het lijkt.

In veel projecten rondom (veelal primaire) waterkeringen wordt een dijk afzonderlijk als waterkering beschouwd en als grondlichaam (volgens Eurocode). In feite worden dezelfde berekeningen gemaakt, maar met een ander doel; bijvoorbeeld een toets op waterveiligheid en een toets op uitvoeringsstabiliteit. De verschillen in richtlijnen zorgen ervoor dat hetzelfde grondlichaam/waterkering met een andere veiligheidsfilosofie, andere grondparameters en andere waterstanden wordt benaderd. Je kunt je afvragen in hoeverre dit erg is, zeker nu blijkt dat de verkregen betrouwbaarheden tussen verschillende richtlijnen lastig zijn te vergelijken. Een waterkering beschouwen volgens de Eurocode doet geen recht aan de veiligheidsfilosofie van waterkeringen (zoals de differentiatie in meer dan drie betrouwbaarheidsklassen en de faalkansverdeling over meerdere faalmechanismes). Een grondlichaam beschouwen volgens waterkeringrichtlijnen is onnodig complex als gevraagd wordt slechts naar de stabiliteit van de kering als grondlichaam te kijken.

Uit de pilot bleek daarnaast dat elke partij zo zijn eigen verantwoordelijkheden heeft. De waterschappen verantwoorden aan de provincie de veiligheid van een grondlichaam als regionale kering. Het feit dat er een weg op kan liggen die een bepaalde betrouwbaarheid moet hebben is daarbij ondergeschikt. In meerdere mate wordt wel rekening gehouden met kabels en leidingen, maar ook daar speelt dat de betrouwbaarheid de verantwoordelijkheid is van de leidingbeheerder en niet de keringbeheerder.

9.4 Toetsing

9.4.1 Gebruik van instandhoudingsprofielen

Het gebruik van instandhoudingsprofielen kan nuttig zijn als eerste fase van een toetsing. Daarbij worden ze gebruikt om dwarsdoorsneden te filteren op 'evident veilig', zodat de rekenslag wordt verkleind voor de resterende dwarsprofielen. Waarschijnlijk werkt dit alleen voor robuuste keringen, waarbij ook ongunstige/generieke uitgangspunten tot een instandhoudingsprofiel leiden die past bij het aanwezige profiel.

Het gebruik van instandhoudingsprofielen om tot een faalkans op vakniveau te komen is een benadering. Ten eerste omdat de instandhoudingsprofielen semi-probabilistisch zijn afgeleid volgens schadefactor-betrouwbaarheid relaties. Ten tweede omdat de faalkans van een dwarsprofiel wordt toegekend op basis van het instandhoudingsprofiel dat het beste past; de daadwerkelijke faalkans kan iets hoger of lager zijn. Het instandhoudingsprofiel (STPH en STBI) is nu bepaald voor één waterstand, namelijk het MHW horend bij de huidige IPO-klasse III (1/100 jaar). Als er een zuivere faalkans moet worden berekend horend bij een bepaalde waterstand moeten er terugkeertijden van waterstanden beschikbaar zijn. De faalkans van de hoogte is nu bepaald op basis van een decimeringshoogte van 0,30 m. Voor faalkansbepalingen, ook op de andere mechanismen, is dit echter eigenlijk een té grote aanname die niet moet worden gebruikt. Daarnaast is voor piping geen schadefactor-betrouwbaarheid relatie beschikbaar vanuit de LTVRW.

Een rekenslag blijft altijd nodig om een oordeel te vellen over de profielen die niet voldoen aan het instandhoudingsprofiel. Uit de pilot blijkt echter ook dat de slechtste profielen bepalend zijn voor de faalkans op vakniveau. Mede daarom kunnen de instandhoudingsprofielen wel als eerste filter worden gebruikt. Als losstaande toetsing is het minder geschikt.

9.4.2 Algemene beschouwing

Onzes inziens moet de veiligheidsbenadering voor regionale keringen niet te ingewikkeld zijn. Kijkend naar de inspanning die het momenteel al kost om alle primaire keringen te beoordelen, is het niet te doen om iets vergelijkbaars voor regionale keringen te willen.

Eenzijds kunnen maatwerk en vrijheid in het toetsproces helpen om elk type kering op de meest geschikte manier te toetsen. Anderzijds is het zowel voor de keringbeheerders als de markt niet handig als er veel verschillende manieren van toetsing zijn en is het makkelijker als er een eenduidige manier van toetsen is. Het is namelijk voor de markt niet haalbaar om kennis op peil te houden over methodes die slechts sporadisch voorbij komen, het is voor keringbeheerders moeilijker om toetsingen met een bepaalde methode in competitie uit te vragen als slechts een beperkt deel van de markt hier bekwaam in is. Daarnaast is een ontwerp richting de omgeving makkelijker te verdedigen als dit het resultaat is vanuit gangbare normen en richtlijnen.

Een minder zwart/wit-benadering dan de huidige semi-probabilistische toetsing uit de LTVRW zou de mogelijkheid geven om scherper te kunnen toetsen en ontwerp. Om hier de primaire keringen als voorbeeld te nemen: het uitgaan van de overstromingskans-benadering en het gebruik van faalpaden leidt tot meer realistische uitkomsten van zowel beoordeling als ontwerp. Hier is wel een meer integrale beschouwing van de faalmechanismes nodig, iets wat in de huidige toetsing voor regionale keringen nog beperkt aan bod komt.

Tot slot lijkt een (simpele) overstromingskansbenadering ons voor boezemkades logischer dan de huidige overschrijdingskansbenadering. Bij een vrijwel constant peil en beperkt verschil tussen dagelijks en maatgevend peil zegt de overschrijdingskans weinig over de daadwerkelijke veiligheid. Bovendien kan dan eenduidiger een link worden gelegd tussen een economisch optimale faalkans en de norm voor de regionale kering. Voor mensen met meer afstand tot de materie wordt de veiligheidsfilosofie dan mogelijk wel minder begrijpelijk: de standaardfactor van 0,20 tussen overschrijdingskans (puur af te lezen van verwachte waterstanden) en overstromingskans verdwijnt immers.

9.5 Optimale norm/kosten-baten analyse

Het afleiden van de economisch optimale norm met een kosten-batenanalyse is goed werkbaar. Meer onderzoek moet gedaan worden naar hoe gevoelig de optimale norm is voor onzekerheden in de invoerparameters. Daarnaast moet ook meer onderzocht worden hoe gevoelig een dijkontwerp is voor onzekerheid in de optimale faalkans, mogelijk zit hier binnen bepaalde bandbreedtes weinig verschil in. Eerste resultaten binnen de pilot laten zien dat het vereiste ontwerp voor de kering langs de Hunze relatief weinig beïnvloedt wordt door de optimale faalkans, maar een andere praktijkcasus (Geerkade) laat wel gevoeligheid zien.

Uit de eerste onderzoeksvraag is gebleken dat het lastig is om indirecte schades in geld uit te drukken. Daarom speelt nog de vraag in hoeverre het afleiden van de norm volledig aan een kosten-batenanalyse moet worden opgehangen of dat andere (niet-monetaire) effecten ook een belangrijke rol spelen. En zo ja, hoe zijn deze dan mee te nemen in de afweging om tot een normering te komen.

10 Referenties

- [1] Richtlijn Normering keringen langs regionale rivieren. STOWA, 2008.
- [2] Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen (LTVRW). STOWA, 2015.
- [3] Legger Hunze en Aa's. Geraadpleegd via <https://opendata.hunzeenaas.nl/>
- [4] Watersysteemplan Hunze. Waterschap Hunze en Aa's, februari 2008.
- [5] Factsheets Kaderrichtlijn Water. Stroomgebiedsbeheerplan 2022-2027. Waterschap Hunze en Aa's, november 2020.
- [6] Herijking Zuiveringsstrategie. Waterschap Hunze en Aa's, december 2016.
- [7] Neerslaggegevens Gieterveen 1923-2021. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Geraadpleegd via <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen>
- [8] Potenties voor beekvormende processen en macro-fauna in de benedenloop van de Hunze. Bacheloronderzoek Van Hall Instituut, juli 1994
- [9] Handboek wegontwerp 2013. CROW, 2013.
- [10] Bouwen op slappe bodems. Deltares, februari 2008.
- [11] Kostenraming verhoogde kadenormen Eemskanaal-Dollardboezem (EKDB), Verkenning van de kosten voor de aanpak van macrostabiliteit. Royal HaskoningDHV, 2012.
- [12] Faalkansen van boezemkaden vanuit een statistisch perspectief. STOWA/TU Delft, april 2019
- [13] Berekening contante waarde reeks gelijke betalingen. Kennisbank Financieel, geraadpleegd via: <http://www.kb-financieel.nl/berekening-contante-waarde-reeks-gelijke.14660.lynkx>
- [14] Assemblageprotocol WBI2017. Deltares, 11 mei 2021.
- [15] Beheerplan voor bevers in Groningen en Drenthe. Provincie Groningen, geraadpleegd via: <https://www.provinciegroningen.nl/actueel/nieuws/nieuwsartikel/beheerplan-voor-bevers-in-groningen-en-drenthe/>



Onderzoek normering regionale kering

Rapport

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

6 april 2022

Project Onderzoek normering regionale kering
Opdrachtgever Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

Document Onderzoek normering regionale kering
Status Definitief
Datum 6 april 2022
Referentie 128187/22-005.153

Projectcode 128187
Projectleider G.P. van Rinsum MSc
Projectdirecteur ir. M.L. Aalberts

Auteur(s) ir. D.G. Fiolet, G.P. van Rinsum MSc, L.W. Westrik MSc
Gecontroleerd door ir. M.L. Aalberts, G.P. van Rinsum MSc, ir. D.G. Fiolet
Goedgekeurd door G.P. van Rinsum MSc

Paraaf

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer
 Daalsesingel 51c
 Postbus 24087
 3502 MB Utrecht
 +31 (0)30 765 19 00
 www.witteveenbos.com
 KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden vervaelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Onderzoeksvragen	7
1.3	Leeswijzer	7
2	BESCHRIJVING PILOTGEBIED	8
2.1	Gegevens en ligging	8
2.2	Geschiedenis pilotgebied	9
2.3	Type waterkeringen	9
2.4	Watersysteem	9
2.5	Hoogteprofiel	10
2.6	Hoogwater	11
3	SCHADEBEREKENING	13
3.1	Uitgangspunten	13
3.1.1	Hydraulische randvoorwaarden	13
3.1.2	Modellen schadeberekening (HIS-SSM en Waterschadeschatter)	13
3.2	Bovengrens schade (toetspeil in de gehele kadering)	13
3.2.1	HIS-SSM	15
3.2.2	Waterschadeschatter	15
3.2.3	Verschillen HIS-SSM en Waterschadeschatter	17
3.3	Tijdsafhankelijke schadeberekening	17
3.3.1	Debiet bres	17
3.3.2	Breslocatie 1	18
3.3.3	Breslocatie 2	22
3.4	Conclusies schadeberekeningen	26
3.5	Reflectie op analyses	27
4	MAATREGELEN WATERSYSTEEM	28
4.1	Compartimentering achterland	28
4.1.1	Meerlaagse waterveiligheid	28

4.1.2	Compartimentering van het pilotgebied	29
4.1.3	Onderhoudbaarheid compartimenterende dijken ten opzichte van regulier dijken	30
4.2	Compartimenteren buitenwater	31
4.2.1	Mogelijke locaties compartimentering	31
4.2.2	Effect compartimentering op bres Nijegaastervaart	32
4.3	Conclusies maatregelen	33
5	MAATGEVENDE EISEN MEDEGEBRUIK	34
5.1	Faalkans en betrouwbaarheidsindex	34
5.2	Eisen regionale waterkering vanuit de waterveiligheid	34
5.3	Eisen regionale waterkering vanuit de Eurocode	35
5.4	Vormen van medegebruik	36
5.4.1	Wegen over of rondom de waterkering	37
5.4.2	Bruggen met brughoofd op kering	38
5.4.3	Gemalen en duikers door de waterkering	39
5.4.4	Aquaduct als onderdeel van de waterkering	39
5.4.5	Kabels en leidingen	39
5.5	Conclusies medegebruik	40
6	OVERSTROMINGSKANS WATERKERING	41
6.1	Relevante faalmechanismen	41
6.1.1	Probabilistisch	42
6.1.2	Semi-probabilistisch	42
6.1.3	Deterministisch	42
6.2	Werkwijze afhankelijkheden dijkvakken	42
6.2.1	Volledig onafhankelijk (exclusief)	43
6.2.2	Volledig afhankelijk	44
6.3	Hoogte	44
6.3.1	Beoordeling hoogte Wetterskip Fryslân	45
6.3.2	Werkwijze hoogte	45
6.3.3	Dijkvakindeling	46
6.3.4	Overstromingskans per dijkvak	46
6.3.5	Vertaling faalkans dijkvakken naar faalkans dijktraject	47
6.3.6	Gevoeligheidsanalyse kritiek overslagdebiet	49
6.3.7	Gevoeligheidsanalyse waakhoogte	51
6.4	Stabiliteit binnenwaarts	52
6.4.1	Werkwijze filtering	52
6.4.2	Stap 1. Grof filter dijktraject	52
6.4.3	Stap 2a. Eenvoudige rekenregels	55
6.4.4	Stap 2b. Probabilistische berekening	56
6.4.5	Stap 2c. Faalkansupdating op basis van bewezen sterkte	59
6.4.6	Stap 3. Vertaling faalkans per snede naar faalkans dijktraject	61

6.4.7	Aantal onafhankelijke doorsneden	64
6.4.8	Gevoeligheidsanalyse bepaling trajectkansen	65
6.4.9	Gevoeligheidsanalyse verkeersbelasting	67
6.5	Conclusies	68
6.5.1	Hoogte	68
6.5.2	Macrostabieleit	68
6.6	Reflectie op analyses	69
7	KOSTEN-BATENANALYSE	70
7.1	Kosten dijkversterking	70
7.1.1	Profielen per norm	70
7.1.2	Kosten dijkversterking	71
7.2	Baten dijkversterking	73
7.3	Optimale ontwerp- en toetsnorm	74
7.3.1	Optimale ontwerpnorm	74
7.3.2	Gevoeligheid optimale ontwerpnorm	75
7.4	Acceptabele schade per norm	77
7.5	Knikpunt als gevolg van toepassing damwand	77
7.6	Kostenefficiëntie compartimentering pilotgebied	78
7.7	Kostenefficiëntie compartimentering buitenwater	79
7.8	Conclusies Maatschappelijke Kosten-Baten Analyses	79
7.9	Reflectie op analyse	79
8	REFERENTIES	81
	Laatste pagina	821
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Probabilistische macro-stabiliteitsanalyse met bewezen sterkte	4
II	Foto-impressie Boezemkade - landelijk veldbezoek	4
III	Maatgevend boezempeil	1
IV	Memo gedifferentieerd normeren	12

1

INLEIDING

1.1 Aanleiding

Het Nederlandse waterkeringsstelsel bestaat onder andere uit primaire, regionale en overige keringen. Voor de primaire waterkeringen is recent (2017) overgestapt van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering per dijktraject. Voor regionale keringen wordt momenteel uitgegaan van een overschrijdingskansbenadering. Voor de regionale keringen is verkend op welke wijze de vigerende veiligheidsbenadering kan worden aangepast. Op basis van die verkenning is geconcludeerd dat een regionale benadering wenselijk is, die recht doet aan de verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen. Ten behoeve van de invulling van de specifieke regionale benadering zijn vier pilots uitgevoerd, waarin een top 4 met denkbare aanpassingen zijn uitgetoetst. Voor een goed landelijk beeld zijn hiervoor 2 typen regionale keringen beschouwd, en 2 typen beschermde gebieden. Aldus resulteren 4 pilots, te weten:

- Boezemkade – landelijk: een kade langs een boezem die een landelijk gebied beschermt;
- Boezemkade – stedelijk: een kade langs een boezem die een stedelijk gebied beschermt;
- Regionale rivier – landelijk: een kering langs een regionale rivier die een landelijk gebied beschermt;
- Regionale rivier – stedelijk: een kering langs een regionale rivier die een stedelijk gebied beschermt.

Onderzoeksvragen

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de aanpassing van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. Daartoe zijn de volgende denkbare aanpassingen onderzocht:

- normeren:
 - o uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming, zowel binnen als buiten het overstroomde gebied;
 - o rekening houden met maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
 - o medegebruik: kan medegebruik maatgevende eisen stellen aan de kering die moeten worden meegewogen bij de normstelling van de kering uit oogpunt waterveiligheid;
 - o de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses);
- toetsen:
 - o werkwijzen voor de toetsing.

Afhankelijk van de aard van de pilot zijn binnen de uitwerking de accenten op verschillende onderdelen gelegd. Zo is in één pilot veel aandacht besteed aan het rekening houden met slachtoffers, terwijl in een andere bijvoorbeeld de meerwaarde van een gedifferentieerde (per faalmechanisme) normering. Ook zijn de wijzen waarop is geverifieerd op de sterkte van de kering aan de norm voldoet op verschillende wijzen uitgewerkt, teneinde de bruikbaarheid van enkele (internationale) werkwijzen voor zo'n verificatie te verkennen. Hoewel de pilots dus generiek van opzet zijn, verschillen het detailniveau waarin de onderzoeksvragen zijn uitgewerkt.

Disclaimer

Voor de uitwerking van de pilots is gebruik gemaakt van werkelijke dijkvakken en beschermde gebieden. Het doel van de pilots is de toegevoegde waarde, de haalbaarheid en de consequentie van verschillende aanpassingen van de toets- en normeringsmethodes te onderzoeken. Het verkrijgen van een gedetailleerd en accuraat beeld van de actuele waterveiligheid in de pilotgebieden was nadrukkelijk niet het doel. Uit oogpunt van doelmatigheid van de uitwerking zijn uitgangspunten soms vereenvoudigd of zijn (soms grove) aannamen gedaan, daar waar dat acceptabel was uit oogpunt van de doelstelling van de pilots. Daarmee hebben de resultaten zoals de optimale normen en het aangetoonde veiligheidsniveau geen betekenis voor de beschouwde pilotgebied. Benadrukt wordt daarom dat geen van de conclusies uit dit rapport gebruikt kunnen worden om conclusies aan te verbinden over de beschouwde pilotgebieden.

Dit rapport beschrijft één van deze pilots: Boezemkade - landelijk, in beheer bij Wetterskip Fryslân.

1.2 Onderzoeksvragen

In dit rapport worden de volgende 5 onderwerpen uitgewerkt:

- 1 **schadeberekening:** onderzoek naar de schade en het aantal slachtoffers dat op kan treden als gevolg van een dijkdoorbraak;
- 2 **systeemmaatregelen:** onderzoek naar de wijze waarop de gevolgen van een overstroming kunnen worden beperkt door het nemen van maatregelen in het (water)systeem voorafgaand aan hoogwater;
- 3 **maatgevende eisen beheer en onderhoud:** onderzoek naar de eisen die worden gesteld door het medegebruik van de waterkering (bijvoorbeeld door de aanwezigheid van een weg of leiding) en hoe deze eisen zich verhouden tot de eisen die worden gesteld vanuit waterveiligheid;
- 4 **overstromingskans waterkering:** onderzoek naar de wijze waarop beoordeeld wordt of de sterkte van de kering voldoet aan de genormeerde overstromingskans voor een gebied en op welke wijze deze kan worden vertaald in eisen aan de kering;
- 5 **kosten-batenanalyse:** onderzoek naar de kosten en baten van een dijkversterking.

Na het afronden van de eerste versie van deze rapportage is een aanvullende vraag behandeld over gedifferentieerd normeren (een verschillende norm voor falen met bres en falen zonder bres: overlopen). Deze studie is als separate memo in bijlage IV opgenomen.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is een beschrijving opgenomen van het pilotgebied, dit dient als basis en achtergrond voor de rest van het onderzoek. In hoofdstuk 3 tot en met 6 zijn achtereenvolgens de onderzoeksvragen 1 tot en met 4 beschreven. In hoofdstuk 7 is een kosten-batenanalyse opgenomen. In bijlage IV is een zelfstandig leesbare memo opgenomen met een aanvullende studie naar gedifferentieerd normeren.

2

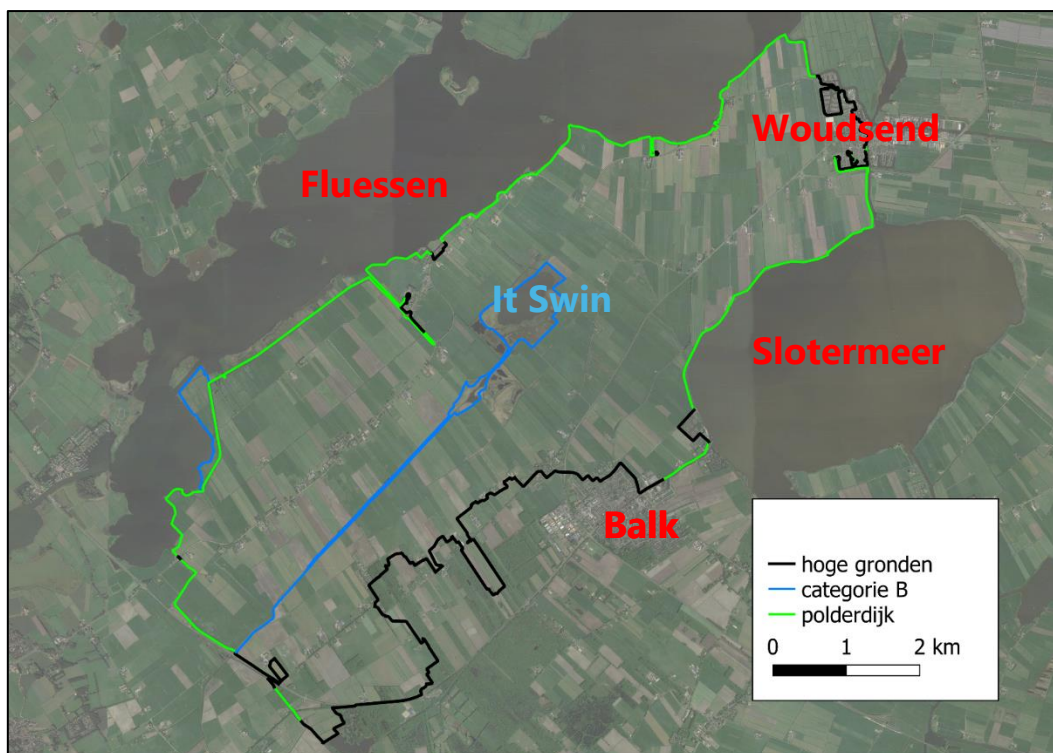
BESCHRIJVING PILOTGEBIED

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van het pilotgebied Boezemkade - landelijk en het poldergebied binnen deze dijkkring.

2.1 Gegevens en ligging

Het pilotgebied betreft een regionale dijkkring met een lengte van 48,3 km, in het zuidwesten van de provincie Friesland. Het gebied is in beheer bij Wetterskip Fryslân en heeft IPO-klasse III. De waterkering omsluit een polder met landbouwgronden, een aantal dorpjes en het natuurgebied It Swin. De kadering omringt de volgende polders: Grootte Noordwolderpolder, Venenpolder, Spookhoekstervaart, Harich-Elahuizen en Yndyk. Rondom het pilotgebied bevinden zich 2 dorpen: Woudsend en Balk, waarvan de locatie is weergegeven in Afbeelding 2.1. Binnen het pilotgebied bevinden zich nog een aantal kleinere dorpjes.

Afbeelding 2.1 Boezemkade - landelijk



2.2 Geschiedenis pilotgebied

De contouren van Zuidwest Friesland zijn in de voorlaatste ijstijd (circa 800 v. Chr.) gevormd [ref. 1]. Door de beweging van een ijskap vanuit Scandinavië over Noord- en Midden Nederland ontstaat het Gaasterlandse stuwwal-landschap. In de periode na de voorlaatste ijstijd zorgden inbraken vanuit de zee voor de afzetting van klei. Daarbij vormde zich een nieuw kleilandschap met strandwallen en kwelders. Verder landinwaarts ontwikkelde zich gedurende deze periode een grootschalig veenlandschap. Aan het begin van de ijzertijd (circa 700 v. Chr.) werden de kweldergronden steeds meer gebruikt voor veeteelt en akkerbouw. Het kweldergebied slibde steeds verder op en het achterland bleef steeds langer droog liggen tijdens vloed. In deze periode ontstond er permanente bewoning in Zuidwest Friesland op terpen. Vanaf de twaalfde eeuw werden de hoofdstructuren van het landschap definitief. De veenontginningen hadden in deze periode hun grens bereikt en door de dalende bodem werd het steeds moeilijker om de veengebieden te ontwateren. Om toch droge voeten te houden, werd een netwerk van sloten, kanalen en vaarten aangelegd. Ook veel van de Friese meren zijn in deze periode ontstaan.

Pilot Boezemkade - landelijk ligt midden in Zuidwest Fryslân en wordt omsloten door verschillende meren, vaarten en kanalen. De polders die omsloten worden door de kadering bestaan voornamelijk uit veengronden. Richting het zuidelijke deel van de polder verandert de ondergrond langzaam naar zand en de hoge gronden van het Gaasterland. Dit is duidelijk terug te zien in de zandige hoge gronden in het zuiden van de kadering.

2.3 Type waterkeringen

Boezemkade - landelijk bestaat uit 2 typen regionale keringen:

- polderdijken;
- hoge-grond-keringen.

Deze worden weergegeven in afbeelding 2.1. De regionale waterkering heeft een IPO-klasse III, met een normering van 1:100 per jaar, deze worden weergegeven in tabel 2.1. Ook loopt er een categorie B-waterkering door het gebied, weergegeven in afbeelding 2.1. Deze waterkering ligt rondom de watergang De Rien, die het natuurgebied It Swin verbindt met de rest van het watersysteem. Deze waterkering functioneert als peilbeheersing op De Rien. Ten westen van het pilotgebied is ook een buitendijkse categorie B-kering aanwezig in het voorland.

Tabel 2.1 IPO-klassen [ref. 29]

IPO-klasse	I	II	III	IV	V
veiligheidsnorm [1/jaar]	1/10	1/30	1/100	1/300	1/1000
gevolgschade criteria voor klasse [mln. euro]	< 8	8 - 25	25 - 80	80 - 250	> 250

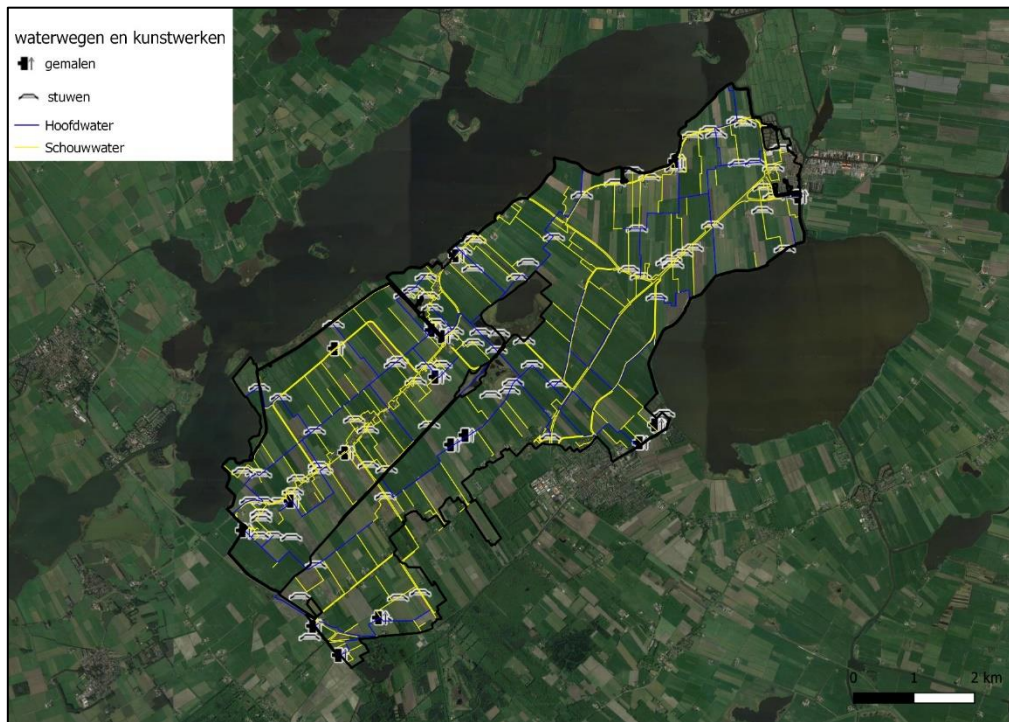
2.4 Watersysteem

Boezemkade - landelijk ligt tussen de meren Fluessen en het Slotermeer. Het Fluessen loopt over in het Heegermeer en het noordoosten en de Holken in het zuiden (in voorliggend rapport wordt dit gehele waterlichaam het Fluessen genoemd). Het Fluessen en het Slotermeer zijn met elkaar verbonden door de vaarten de Ie (bij Woudsend). Via het dorp Balk sluiten de meren ook op elkaar aan via het riviertje de Luts en de watergang de Rusterfeart. De watergangen binnen Boezemkade - landelijk zijn opgedeeld in 2 typen:

- hoofdwater;
- schouwwater.

Voor schouwwater zijn de eigenaren van het land verantwoordelijk voor onderhoud aan de sloten. Bij hoofdwateren is het Wetterskip Fryslân verantwoordelijk voor onderhoud. Een stelsel van stuwen, duikers en sifons verbindt de watergangen met elkaar en verzorgt de binnendijkse waterhuishouding. Overtollig water kan door verschillende gemalen worden geloosd op de boezem. Via het boezemstelsel wordt dit water uiteindelijk gespuid naar het IJsselmeer en de Waddenzee. Het streefpeil is in de hele Friese boezem gelijk en bedraagt NAP -0,52 m [ref. 2]. Het toetspeil ligt rond circa NAP +0 m (zie bijlage III). Het binnendijkse watersysteem is weergegeven in afbeelding 2.2.

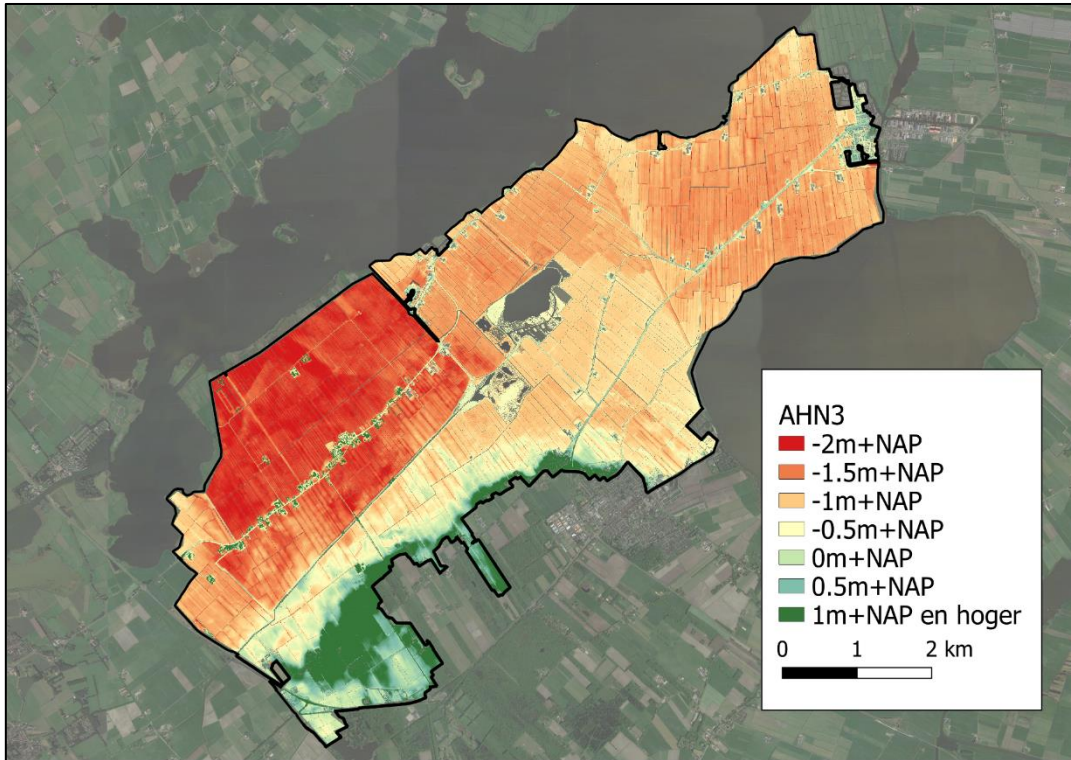
Afbeelding 2.2 Binnendijkse waterwegen en kunstwerken [ref. 3]



2.5 Hoogteprofiel

In afbeelding 2.3 is een hoogtekaart weergegeven van het gebied op basis van het AHN3. Het westelijk deel van het achterland ligt laag met een maaiveldhoogte rond NAP -2,0 á NAP -1,5 m. Het noordelijke deel van het achterland ligt rond NAP -1,5 á NAP -1,0 m. De rest van het achterland ligt rond NAP -1,0 á NAP +0,5 m, met uitzondering van de hoge gronden in het zuiden. Deze liggen rond NAP +1,0 m en hoger.

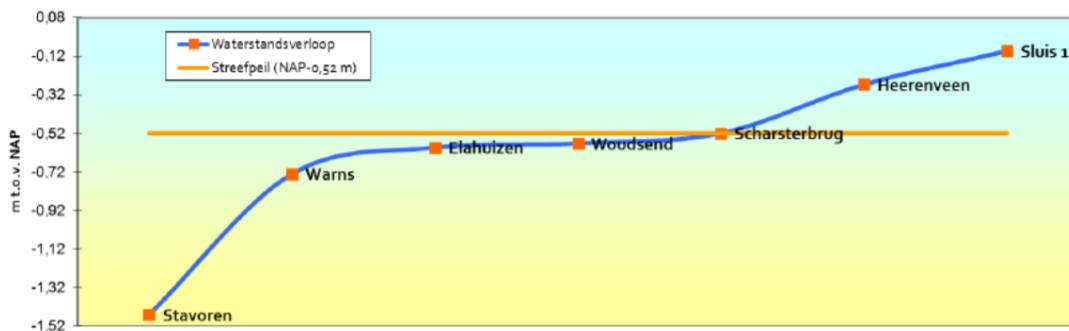
Afbeelding 2.3 Hoogteprofiel achterland op basis van AHN3



2.6 Hoogwater

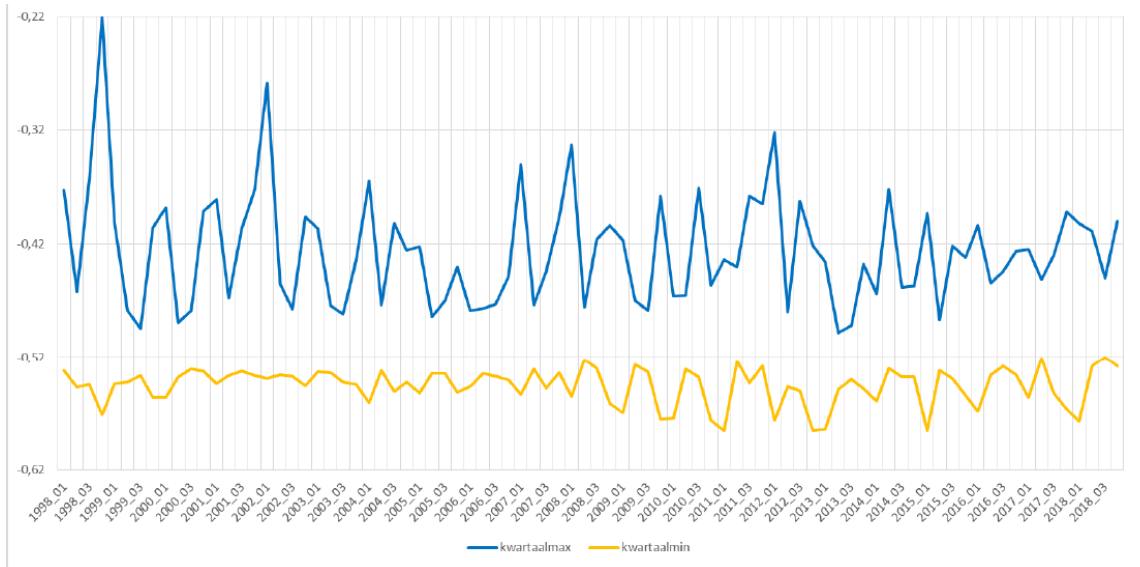
Hoogwater op de Friese boezem is het gevolg van een combinatie van regenval en wind. Langdurige regenval zorgt voor een verhoging van het boezempeil. Dit water kan door middel van gemalen en (spui)sluizen afgevoerd worden richting het IJsselmeer of de Waddenzee. Harde wind kan zorgen voor verhoogde waterstanden door scheefstand van het peil in de boezem. In afbeelding 2.4 is weergegeven hoe wind leidt tot scheefstand in het waterpeil in de boezem ten opzichte van streefpeil.

Afbeelding 2.4 Het verschil in waterpeil over de boezem als gevolg van extreme wind in 2017 [ref. 2]

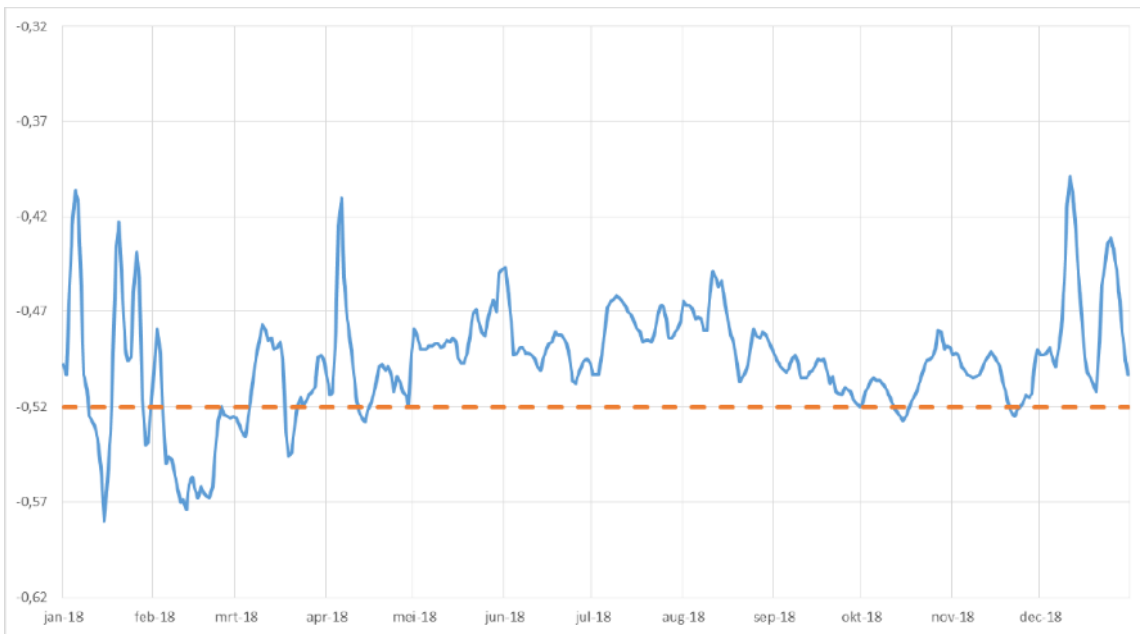


Ter indicatie van de te verwachten waterstanden op de Friese boezem is het verloop van de waterstand op de Friese boezem is weergegeven in afbeelding 2.5 (maxima en minima per kwartaal gedurende de periode 1998 tot 2018) en in afbeelding 2.6 (gemiddeld boezempeil in 2018).

Afbeelding 2.5 Maxima en minima per kwartaal (tijdvak 1998-2018) [ref. 2]



Afbeelding 2.6 Verloop gemiddelde boezemwaterstand 2018 [ref. 2]



3

SCHADEBEREKENING

In dit hoofdstuk is onderzocht hoe groot de schade en het aantal slachtoffers zijn die op kunnen treden als gevolg van een dijkdoorbraak. In dit hoofdstuk zijn 3 scenario's berekend:

- bovengrensbenadering, toetspeil in gehele polder, paragraaf 3.2;
- tijdsafhankelijke benadering, waterpeil in polder afhankelijk van tijd voor 2 breslocaties:
 - breslocatie 1, paragraaf 3.3.2;
 - breslocatie 2, paragraaf 3.3.3.

3.1 Uitgangspunten

3.1.1 Hydraulische randvoorwaarden

Als maatgevend hoogwater is een buitenwaterstand van NAP +0 m aangenomen. Deze waterstand is gelijk aan het toetspeil in het gebied (zie paragraaf 2.4).

3.1.2 Modellen schadeberekening (HIS-SSM en Waterschadeschatter)

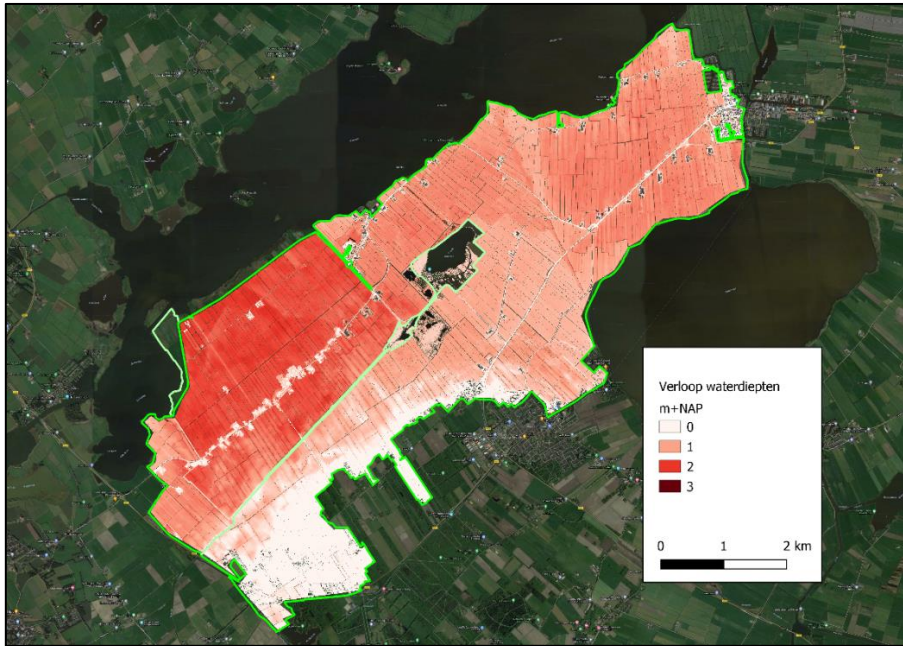
Voor het bepalen van de schade als gevolg van instroom van water is gebruik gemaakt van 2 modellen:

- Hoogwater Informatie Systeem module Schade en Slachtoffers (HIS-SSM) is ontwikkeld door Rijkswaterstaat om schade en slachtoffers te berekenen aan de hand van overstromingssimulaties. De module is geschikt om waterschade en slachtoffers te berekenen als gevolg van grote waterdieptes;
- de waterschadeschatter is een web-based applicatie ontwikkeld door Deltares. De waterschadeschatter is ontwikkeld om wateroverlast met geringe waterdiepten te berekenen. De Waterschadeschatter berekent geen slachtoffers ten gevolge van overstromingen.

3.2 Bovengrens schade (toetspeil in de gehele kadering)

De maximale schade treedt op wanneer in de gehele polder een waterstand gelijk aan toetspeil aanwezig is. Dit betekent dat alle delen van de polder met een bodemhoogte onder NAP -0 m (toetspeil) onder water staan (waterdiepte = toetspeil - AHN3). Dit schadebeeld is weergegeven in afbeelding 3.1 en geeft een veilige bovengrens van de mogelijk schade in de polder omdat er geen rekening wordt gehouden met natuurlijke obstakels en tijdsafhankelijkheid.

Afbeelding 3.1 Waterdiepten bij binnenwaterstand NAP +0 m (toetspeil aanwezig in de gehele kadering)



De schade als gevolg van deze waterdiepte is zowel met HIS-SSM als met de Waterschadeschatter berekend, zodat de modellen vergeleken kunnen worden.

Aquaduct Woudsend (Ee)

Ten zuiden van Woudsend ligt het Ee-Aquaduct, weergegeven in afbeelding 3.2. Het Ee-Aquaduct vormt een doorgang onder het Ie (inclusief de waterkering). Een inundatie van het achterland van de kadering kan via het aquaduct naar het achterland van naastgelegen kadering stromen en daar schade veroorzaken.

Afbeelding 3.2 Ee-Aquaduct ten zuiden van Woudsend



Rondom het Ee-Aquaduct ligt een kleine kanteldijk met een kerende hoogte van circa NAP -0,8 m aan de zijde van het pilotgebied en circa NAP -0,6 m aan de zijde van naastgelegen kadering. De kerende hoogte van het aquaduct is hiermee NAP -0,6 m (tegen binnendijks water. Tegen buitendijks water is het aquaduct net zo hoog als de overige waterkeringen). De schade als gevolg van inundatie van naastgelegen kadering via het aquaduct is niet beschouwd in dit rapport. Wel is in de tijdsafhankelijke schadeberekening in paragraaf 3.3 opgenomen vanaf welk tijdstip deze inundatie begint.

3.2.1 HIS-SSM

In tabel 3.1 is de schadeberekening weergegeven conform HIS-SSM. De totale schade als gevolg van de inundatie bedraagt EUR 45.000.000,--. Van deze schade komt EUR 36.000.000,-- (80 %) uit de categorie 'landbouw'. Naast de economische schade zijn er 11 getroffen en geen (dodelijke) slachtoffers.

Tabel 3.1 Schaderapport HIS-SSM bij toetspeil in gehele polder (geen tijdsafhankelijkheid)

Categoriernaam	Schade [EUR]	No. objecten	Eenheid
totaal schade	45.000.000,--	-	-
overige: landbouw	36.000.000,--	29.410.000	m ²
overige: gemalen	4.700.000,--	8	objecten
infrastructuur: overige wegen	2.000.000,--	24.360	m
overige: stedelijk gebied	1.800.000,--	133.600	m ²
overige: extensieve recreatie	470.000,--	74.180	m ²
infrastructuur: autowegen	300.000,--	1.073	m
woningen: eengezinswoningen inboedel	69.000,--	5	objecten
overige: intensieve recreatie	34.000,--	6.225	m ²
woningen: eengezinswoningen opstal	25.000,--	1.529	m ²
bedrijven: bijeenkomst	20.000,--	346	m ²
overige: vervoersmiddelen	4.000,--	4	objecten
slachtoffers zonder evacuatie	0	-	personen
getroffenen: eengezinswoningen	11	-	personen

3.2.2 Waterschadeschatter

Het schaderapport is weergegeven in tabel 3.3. De hoogte van de schade is afhankelijk van de duur van de overlast en de hersteltijd van de wegen en bebouwing. Er zijn daarom 2 scenario's doorgerekend: een kortere en langere overlast en hersteltijd. De invoerparameters zijn weergegeven in tabel 3.2.

Tabel 3.2 Invoerparameters kortere en langere overlast en hersteltijd

Parameter	Kortere overlast en hersteltijd	Langere overlast en hersteltijd
duur overlast	48 uur	240 uur (geen maximale waarde, gekozen om 10 dagen aan te houden, de maximale hersteltijd voor wegen en bebouwing);
hersteltijd wegen	6 uur	10 dagen (maximale duur die kan worden ingevoerd)
hersteltijd bebouwing	2 dagen	10 dagen (maximale duur die kan worden ingevoerd)
maand van de gebeurtenis	juli	juli
schadefuncties	maximaal	maximaal

De schade in het pilotgebied varieert tussen EUR 16.000.000,-- (kortere overlast en hersteltijd) en EUR 30.000.000,-- (langere overlast en hersteltijd). Deze schade wordt volgens Waterschadeschatter grotendeel veroorzaakt door schade in de categorie 'woonfunctie' (circa 50 % en 30 % van de schade in de respectievelijke scenario's). Bij een langdurigere overlast en hersteltijd stijgt de schade in alle categorieën. De stijging in de categorie 'industriefunctie' is in absolute getallen het grootst (circa EUR 4.500.000,-- extra schade). Bij een langere overlast en hersteltijd valt de schade in IPO-klasse III. Bij kortere overlast en hersteltijd valt de schade in IPO-klasse II. De Waterschadeschatter berekent geen slachtoffers en/of getroffen.

Tabel 3.3 Schaderapport Waterschadeschatter

	Schade in EUR bij: - duur overlast = 48 uur - hersteltijd wegen = 6 uur - hersteltijd bebouwing = 2 dagen	Schade in EUR bij: - duur overlast = 240 uur - hersteltijd wegen = 10 dagen - hersteltijd bebouwing = 10 dagen	Oppervlakte [hectare]
totaal schade	16.098.135,--	29.609.128,--	2831,9
woonfunctie	8.612.793,--	11.388.761,--	2,4
industriefunctie	2.677.764,--	7.062.924,--	0,5
kantoorfunctie	1.024.640,--	2.689.680,--	0,2
weidehooi	890.112,--	1.919.849,--	2.466,4
onderwijsfunctie	747.360,--	1.961.820,--	0,1
logiesfunctie	615.454,--	1.674.953,--	0,1
gezondheidszorgfunctie	449.920,--	1.181.040,--	0,1
mais snij	394.459,--	657.432,--	197,2
verkeerseiland	257.880,--	257.880,--	0,0
bijeenkomstfunctie	149.762,--	196.290,--	0,0
winkelfunctie	118.080,--	309.960,--	0,0
pootaardappelen	41.222,--	68.703,--	26,2
woongebied	35.572,--	35.572,--	47,3
sportfunctie	32.459,--	69.227,--	0,0
agrarisch gras en veevoerders	11.695,--	25.225,--	32,4
lokale weg	9.155,--	10.173,--	13,7
mais korrel	7.345,--	15.842,--	20,4
overige wegdelen	7.302,--	8.113,--	10,8
gerst	6.076,--	13.104,--	7,7
verblijfsrecreatief terrein	4.159,--	4.159,--	3,2
regionale weg	3.154,--	56.087,--	0,8

* Ten behoeve van de leesbaarheid van deze tabel zijn schadecategorieën met < EUR 1.000,-- schade niet weergegeven. Deze schade is wel meegenomen in het totaalbedrag.

3.2.3 Verschillen HIS-SSM en Waterschadeschatter

HIS-SSM en de Waterschadeschatter tonen een verschillend schadebeeld. De schade berekend met HIS-SSM bedraagt EUR 45.000.000,-- hetgeen overeenkomt met IPO-klasse III (dit is ook de huidige IPO-klasse van het pilotgebied). De schade berekend met Waterschadeschatter is significant lager met EUR 16.000.000,-- (bij kortdurige overlast en hersteltijd, IPO-klasse II) tot EUR 30.000.000,-- (bij langdurige overlast en hersteltijd, IPO-klasse III). De schademodelen verschillen daarnaast in de opbouw van de schade. De schade in HIS-SSM bestaat voornamelijk uit landbouw, gemalen en wegen. De schade in de Waterschadeschatter bestaat voornamelijk uit woonfunctie, industriefunctie en kantoorfunctie.

3.3 Tijdsafhankelijke schadeberekening

De schadeberekeningen in paragraaf 3.2 beschrijven een scenario waarin de buitenwaterstand is geprojecteerd over het gehele binnendijkse gebied. In realiteit loopt het gebied over tijd vol, waarbij als gevolg van de hoogteligging, komberging en het instromend debiet de schade over tijd ontwikkeld. In deze paragraaf is voor 2 breslocaties een tijdsafhankelijke schadeberekening uitgevoerd.

3.3.1 Debiet bres

Het instromend debiet is tijdsafhankelijk berekend op basis van het verval en de stroom voerende breedte van de bres (beiden als functie van tijd).

Instroombodem

Het debiet dat door een bres de polder in stroomt is gemodelleerd als een overlaat. Afhankelijk van de binnenwaterstand gedraagt de overlaat zich volkomen (geen invloed van de binnenwaterstand op het debiet) of onvolkomen (wel invloed van de binnenwaterstand op het debiet) [ref. 5]:

$$Q_{in} = B * m * 0,55 * \sqrt{9,81 * (h_{bu} - h_{dr})^3} \quad \text{voor} \quad h_{bu} \geq \frac{3}{2}h_{bi} - \frac{1}{2} * h_{dr} \quad (\text{volkomen})$$

En

$$Q_{in} = B * m * (h_{bu} - h_{dr}) * \sqrt{2 * 9,81 * (h_{bu} - h_{bi})} \quad \text{voor} \quad h_{bu} < \frac{3}{2}h_{bi} - \frac{1}{2} * h_{dr} \quad (\text{onvolkomen})$$

Waarin:

- B de bresbreedte (berekend op basis van onderstaande paragraaf) [m];
- m de modelfactor (aangenomen op 1,0) [-];
- h_{bu} de buitenwaterstand (aangenomen constant op toetspeil, NAP +0 m) [m+NAP];
- h_{dr} de drempelhoogte (aangenomen gelijk te zijn aan het binnenmaaiveld) [m+NAP];
- h_{bi} de binnenwaterstand (berekend op basis van het kombergend vermogen en de instroming [m +NAP].

Bresbreedte

De breedte van de bres is berekend op basis van de Verheij-vd Knaap formule [ref. 4]:

$$B = 1,3 \frac{9,81^{0,5} * (h_{bu} - h_{bi})^{1,5}}{u_c} \log\left(1 + \frac{0,04 * 9,81}{u_c} * t\right)$$

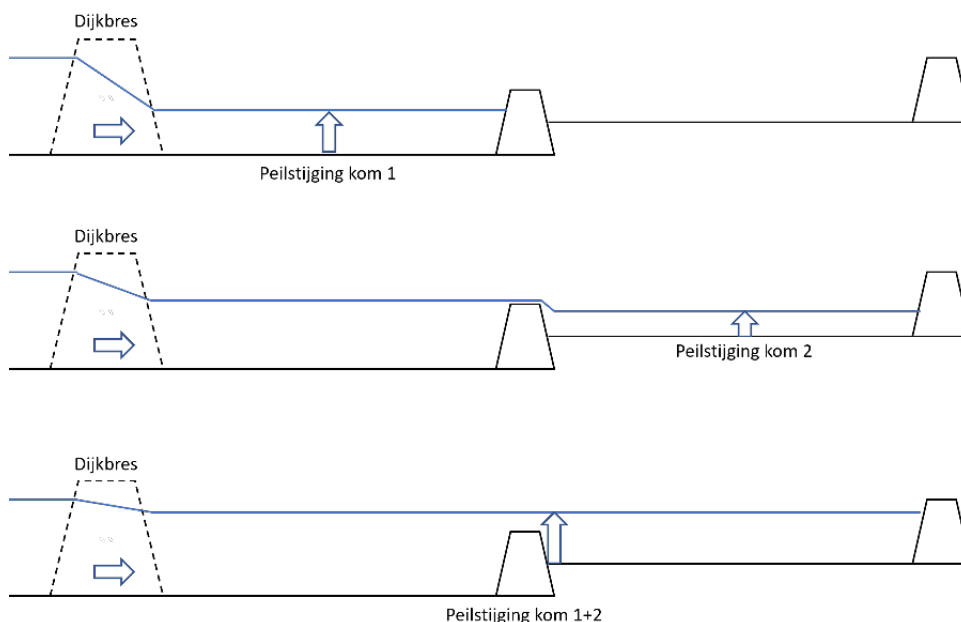
Waarin:

- $(h_{bu} - h_{bi})$ het initiële verval (toetspeil - binnenmaaiveld) [m];
- u_c de kritieke stroomsnelheid van het dijkmateriaal [m/s];
- de kwaliteit van de dijkklei is niet bekend, daarom zijn 2 scenario's uitgewerkt:
 - compacte klei met $u_c = 1$ m/s;
 - slappe klei met $u_c = 0,4$ m/s;
- t de tijd sinds de initiële bres [seconden].

Binnenwaterstand

De verhoging van de binnenwaterstand is berekend door de het instromend volume te delen door het bergend oppervlak in het inunderende gebied. Zodra de binnenwaterstand hoger wordt dan een aanwezige drempel in het achterland (zoals een hoog gelegen weg), kan het water een volgende kom bereiken en dit gebied inunderen. Er is aangenomen dat dit pas kan gebeuren zodra de waterstand hoger wordt dan de kruin van deze drempel, dus de stabiliteit van deze achterliggende drempels is niet beschouwd. Dit is weergegeven in afbeelding 3.3.

Afbeelding 3.3 Aangenomen instroming en peilstijging in de kommen in het achterland

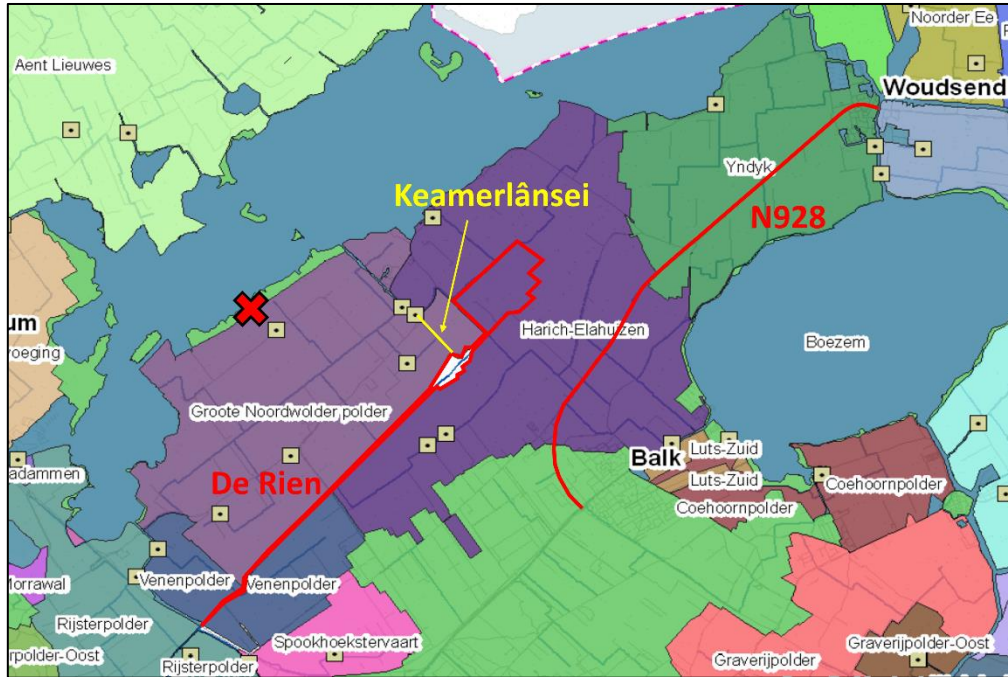


3.3.2 Breslocatie 1

Als eerste breslocatie is gekozen voor de locatie met het grootste verval. Het binnenmaaiveld ligt hier op circa NAP -2,0 m, 2 m onder het toetspeil. Dit is de noordwestzijde van de Groote Noordwolderpolder. Op basis van het AHN3, beschikbare beheerdocumenten van de waterwatergangen, duikers en sifons en de bemalingsgebieden (weergegeven in afbeelding 3.4) is het overstromingsgebied ingedeeld in de volgende kommen:

- kom 1: Groote Noordwolderpolder;
- kom 2: Venenpolder en de westzijde van Harich-Elahuizen en Yndijk, ten noordwesten van de N928;
- kom 3: de rest van de kadering (het gebied ten oosten van de N928).

Afbeelding 3.4 Locatie bres (kruis), met de bemalingsgebieden binnen het pilotgebied en de hoog gelegen grondlichamen

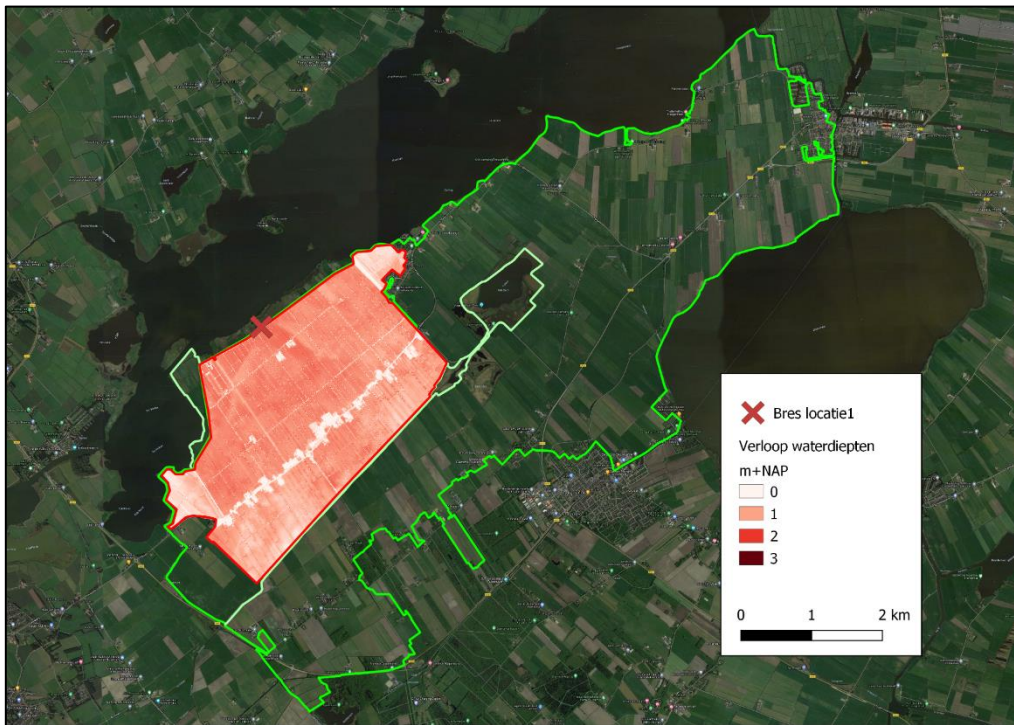


De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

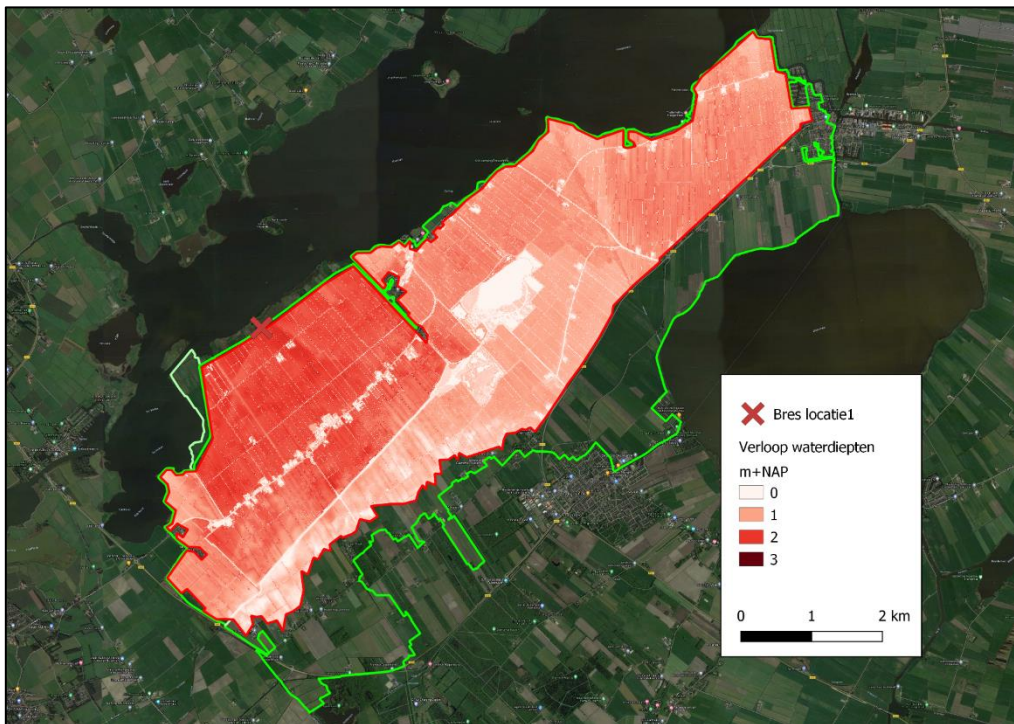
- de peilscheidingen tussen de Grootte Noordwolderpolder en de Venenpolder en Harich-Elahuizen hebben een kerende hoogte van circa NAP -0,6 m op basis van het AHN3. Pas als de binnenwaterstand in de Grootte Noordwolderpolder tot NAP -0,6 m is gestegen zal er stroming richting de Venenpolder, Harich Elahuizen en Yndyk optreden;
- er is aangenomen dat de duikers en sifons **binnen** de bemalingsgebieden open staan en dat duikers en sifons tussen de afzonderlijke bemalingsgebieden gesloten zijn;
- ten oosten van de Grootte Noordwolderpolder ligt de scheiding tussen de bemalingsgebieden ten noorden van de weg Keamerlânsei (zie afbeelding 3.4). Deze weg voorziet echter in kerende hoogte, ter plaatse van de 'officiële' scheiding tussen de bemalingsgebieden lijkt op basis van het AHN3 geen verhoging in het maaiveld aanwezig te zijn. De Keamerlânsei is daarom als rand van de Grootte Noordwolderpolder aangehouden. Er bevindt zich 1 duiker (Ø 0,5 m) onder de Keamerlânsei, hiervan is aangenomen dat deze gesloten is;
- de N928 ligt boven toetspeil (circa NAP +0,2 m tot NAP +0,5 m). Er zal dus geen stroming over dit grondlichaam optreden als gevolg van toetspeil. Overslag ten gevolge van een nieuwe strijklengte in de polder is verwaarloosd. Onder de N928 liggen 2 duikers (Ø 0,8 m) en 1 sifon (dimensies onbekend). Er is aangenomen dat deze doorlaatmiddelen gesloten kunnen worden voordat er significante instroming optreedt richting de oostzijde van de N928. Er treedt in dit scenario ook geen inundatie van de naastgelegen kadering op via het aquaduct Ee.

In afbeelding 3.5 en afbeelding 3.6 zijn de waterdiepten weergegeven bij een binnenwaterstand van NAP -0,6 m (vlak voor de 'doorbraak' vanuit de Grootte Noordwolderpolder naar de rest van het achterland) en bij NAP +0 m (wanneer de binnenwaterstand gelijk is aan de buitenwaterstand). Alle tussenliggende binnenwaterstanden zijn berekend met een stapgrootte van 0,1 m en weergegeven in afbeelding 3.7.

Afbeelding 3.5 Waterdiepten die optreden bij binnenwaterstand van NAP -0,6 m (maximale binnenwaterstand in Groot Noordwolderpolder, voordat de rest van de polder inundeert)

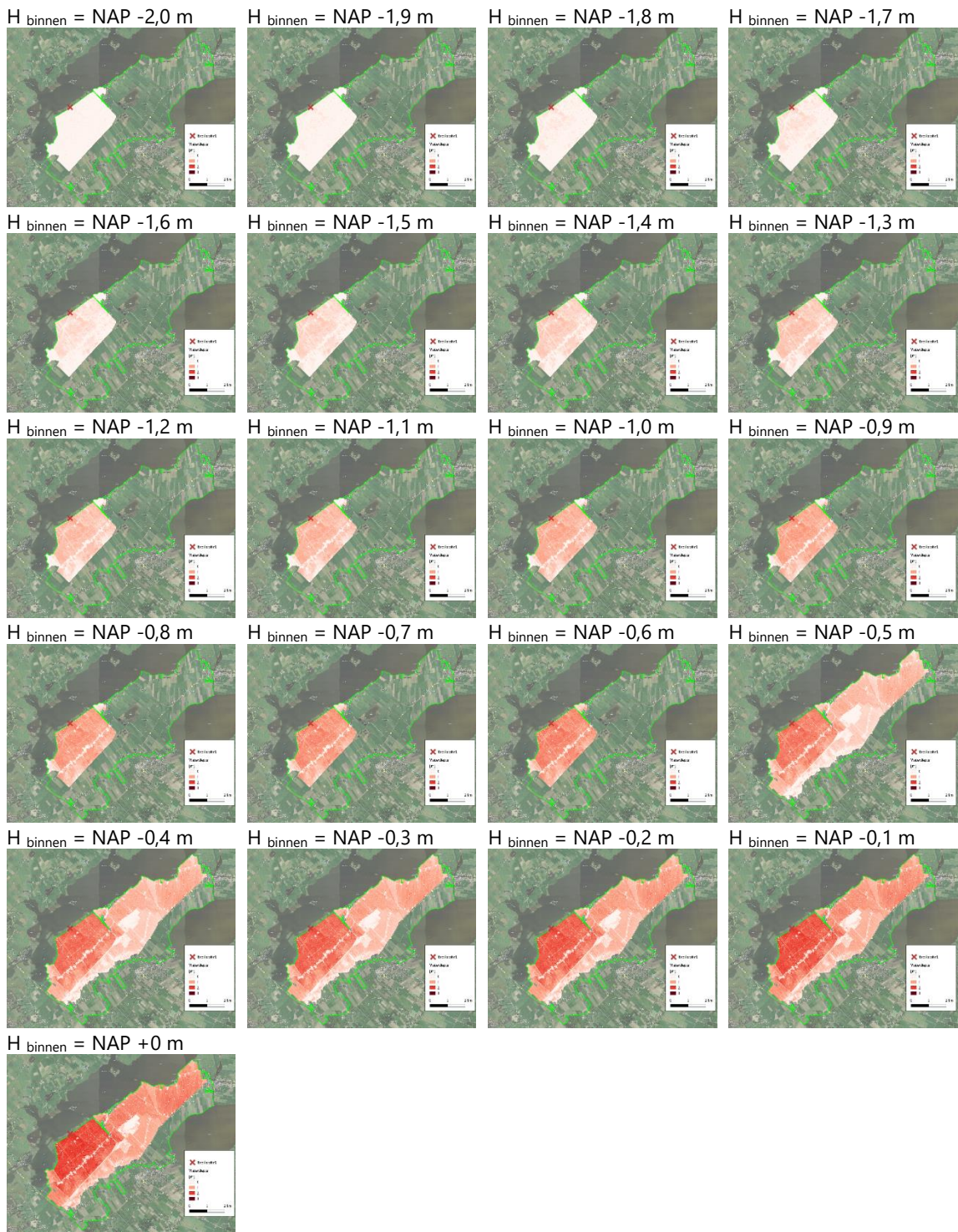


Afbeelding 3.6 Waterdiepten die optreden bij binnenwaterstand van NAP +0 m (toetspeil)

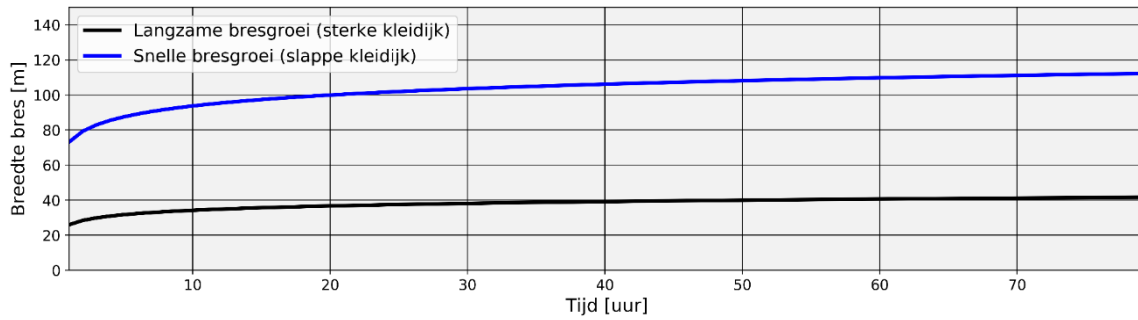


De schade als gevolg van instroming is berekend voor een sterke kleidijk ($u_c = 1$ m/s) en een slappe kleidijk ($u_c = 0,4$ m/s). De optredende bresgroei en de schade zijn weergegeven in afbeelding 3.8 en afbeelding 3.9.

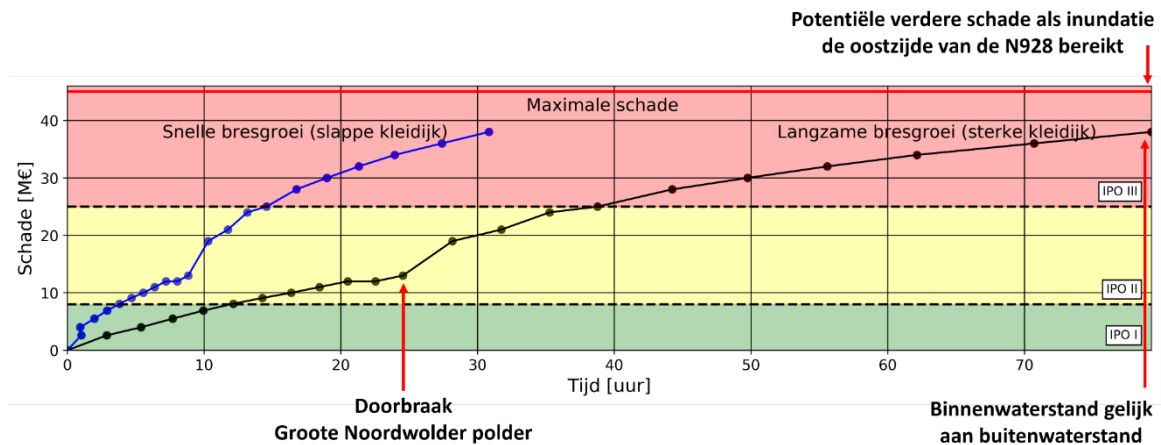
Afbeelding 3.7 Optredende waterdiepten breslocatie 1 bij stijgende binnenwaterstand



Afbeelding 3.8 Bresgroei breslocatie 1



Afbeelding 3.9 Ontwikkeling schade over tijd voor breslocatie 1



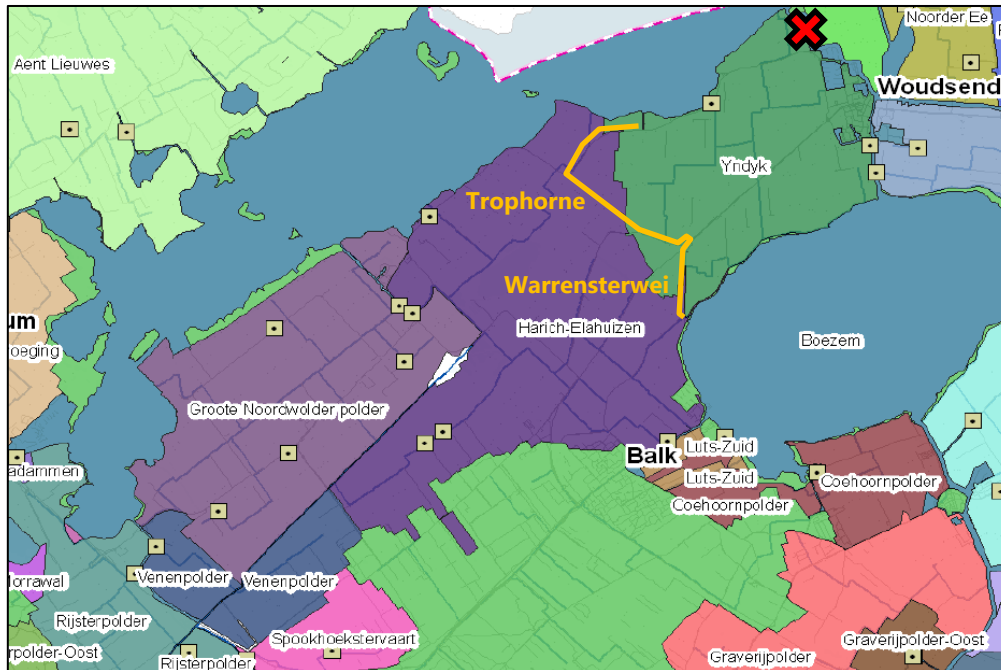
Er is te zien dat de schade zich in hetzelfde patroon ontwikkelt voor een snelle bresgroei als voor een langzame bresgroei, alleen de tijdduur wordt langer of korter. De schade groeit tot EUR 38.000.000,-- in de situatie die is weergegeven in afbeelding 3.6. Er is een verschil van EUR 7.000.000,-- met de maximale schade (bovengrensbenadering, toetspeil in gehele polder). Dit verschil wordt verklaard door het feit dat de provinciale weg ervoor zorgt dat het gebied ten oosten van de weg niet inundeert. Tussen T = 9 uur (slappe kleidijk) en T = 24 uur (sterke kleidijk) treedt de doorbraak van de Groote Noordwolderpolder op. Er is op dat moment een sterke sprong in de schade te zien, omdat er plots een groot nieuw gebied inundeert (hoewel deze inundatie langzamer stijgt door het grotere kombergend oppervlakte).

3.3.3 Breslocatie 2

Als breslocatie 2 is gekozen voor een locatie in de noordoosthoek van de Yndyk polder. Het verval is hier minder groot dan bij breslocatie 1 (circa 1,2 m). Daarnaast bevindt de breslocatie zich in een watergang, in tegenstelling tot in een meer. De energieverliezen die hierdoor optreden in de watergang beïnvloeden de instroming. Op basis van het AHN3, beschikbare beheerdocumenten van de waterwatergangen, duikers en sifons en de bemalingsgebieden (weergegeven in afbeelding 3.4) is het overstromingsgebied ingedeeld in de volgende kommen:

- kom 1: de Yndyk polder, ten oosten van de Trophorne en de Warrensterwei;
- kom 2: de rest van de kadering.

Afbeelding 3.10 Locatie bres (kruis), met de bemalingsgebieden binnen het pilotgebied en de hoog gelegen grondlichamen

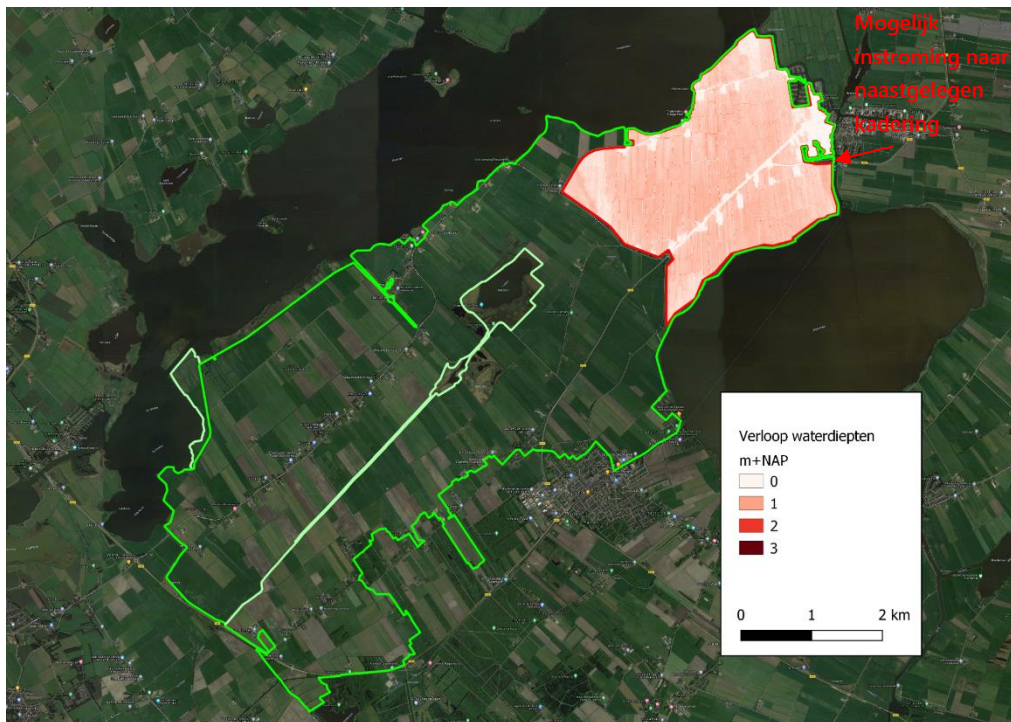


De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

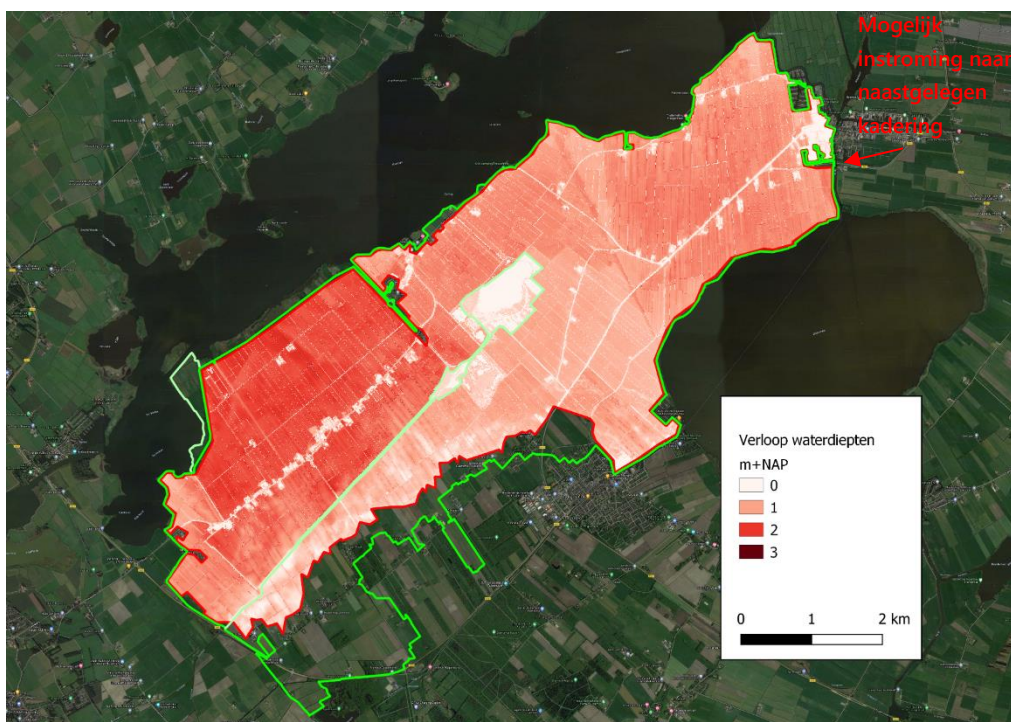
- de peilscheidingen tussen de Yndyk polder en Harich-Elahuizen hebben een kerende hoogte van circa NAP -0,6 m op basis van het AHN3. Pas als de binnenwaterstand in de Yndyk polder tot NAP -0,6 m is gestegen, zal er stroming richting Harich Elahuizen optreden;
- er is aangenomen dat de duikers en sifons **binnen** de verschillende bemalingsgebieden open staan en dat duikers en sifons **tussen** de verschillende bemalingsgebieden gesloten zijn. Voor de duikers die de N928 kruisen is aangenomen dat deze niet gesloten zijn. Er is bij deze breslocatie onvoldoende tijd om deze te sluiten.

In afbeelding 3.11 en afbeelding 3.12 zijn de waterdiepten weergegeven bij een binnenwaterstand van NAP -0,6 m (vlak voor de 'doorbraak' vanuit Yndyk polder naar de rest van het achterland) en bij NAP +0 m (wanneer de binnenwaterstand gelijk is aan de buitenwaterstand). Alle tussenliggende binnenwaterstanden zijn berekend met een stapgrootte van 0,1 m en zijn weergegeven in afbeelding 3.13.

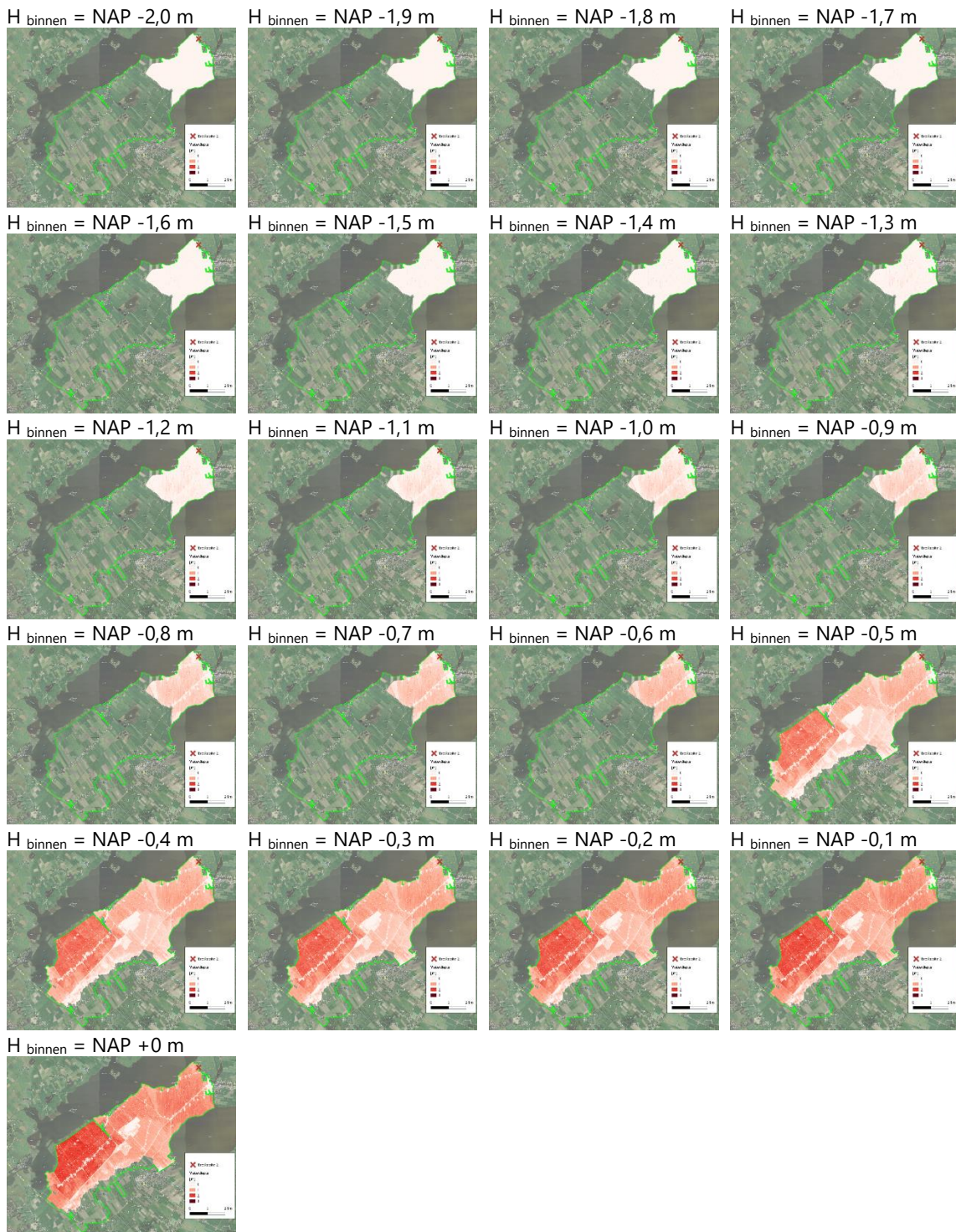
Afbeelding 3.11 Waterdiepten die optreden bij binnenwaterstand van NAP -0,6 m (maximale binnenwaterstand in Yndyk polder, voordat de rest van de polder inundeert)



Afbeelding 3.12 Waterdiepten die optreden bij binnenwaterstand van NAP +0 m (toetspeil)



Afbeelding 3.13 Optredende waterdiepten breslocatie 2 bij stijgende binnenwaterstand



Maximale instroming via watergang

De maximale instroming die kan optreden door de bres is gelimiteerd door de hoeveelheid instroming die kan optreden in de watergang. Het buitenwater moet immers door de watergang stromen om daarna via de bres in te stromen. Er is aangenomen dat er een maximale stroomsnelheid kan optreden in de watergang van 1 m/s. Op basis van de bodemhoogte (NAP -2,15 m) en bodembreedte (31,0 m) op basis van de legger kan worden berekend dat er een maximaal debiet van 67 m³/s door de watergang kan stromen tijdens toetspeil (NAP). Omdat er vanuit 2 richtingen kan worden aangevoerd bedraagt het maximale debiet door het bres 134 m³/s.

Potentiële energieverliezen als gevolg van watergangen

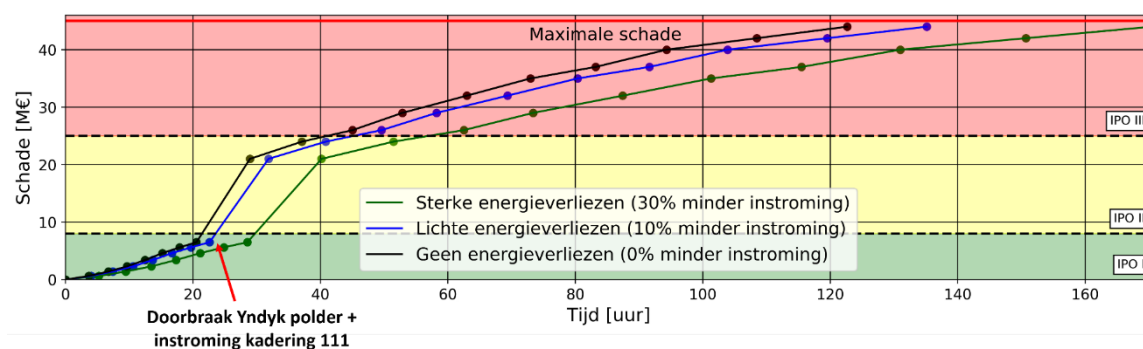
Er is onvoldoende data beschikbaar om de energieverliezen te berekenen die optreden in de watergang na het ontstaan van de bres. De schade als gevolg van instroming is daarom berekend voor 3 scenario's: een sterke reductie van de instroming als gevolg van energieverliezen (30 %) en een zwakke reductie van de instroming als gevolg van energieverliezen (10 %) en geen reductie van de instroming als gevolg van energieverliezen (0 %). Er is voor de bresgroei uitgegaan van goede klei met weinig structuur ($U_c=0,7$ m/s), hetgeen leidt tot een uiteindelijke bresgrootte van circa 30 - 40 m. De schade is uitgezet tegen de tijd in afbeelding 3.14.

De instroming wordt zodoende op 2 wijzen gelimiteerd:

- het debiet kan maximaal 134 m³/s worden (deze bovengrens wordt op geen enkel moment bereikt);
- het debiet wordt verlaagd met 0 %, 10 % of 30 %, afhankelijk van de aangenomen energieverliezen.

Tussen T = 20 uur (bij geen energieverliezen) en T = 28 uur (bij sterke energieverliezen) treedt de doorbraak van de Yndyk polder op. Er is op dat moment een sterke sprong in de schade te zien, omdat er plots een groot nieuw gebied inundeert (hoewel deze inundatie langzamer stijgt door het grotere kombergend vermogen). Tot deze doorbraak blijft de schade beperkt tot zo'n EUR 6.500.000,-- (IPO-klasse I). Na de doorbraak groeit de schade in beide scenario's snel tot IPO-klasse III. In tegenstelling tot de schadeontwikkeling voor breslocatie 1 groeit de schade bij breslocatie 2 uiteindelijk wel tot de maximale schade van EUR 45.000.000,--. Dit wordt verklaard door dat de gehele polder volstroomt, terwijl voor breslocatie 1 de oostzijde van de N928 niet inundeert.

Afbeelding 3.14 Ontwikkeling schade over tijd breslocatie 2



3.4 Conclusies schadeberekeningen

Op basis van de uitgevoerde schadeberekeningen voor het pilotgebied wordt geconcludeerd:

- de potentiële maximale schade in het pilotgebied bedraagt EUR 45.000.000,-- (op basis van HIS-SSM), waarmee de kadering in IPO-klasse III valt;
- de schademodelen HIS-SSM en Waterschadeschatter leiden tot zeer uiteenlopende schadebedragen, waarbij HIS-SSM een schade voor het pilotgebied berekend die 50 % (bij langdurige overlast en hersteltijd in Waterschadeschatter) tot 200 % (bij kortdurende overlast en hersteltijd in Waterschadeschatter) hoger is;
- het achterland van het pilotgebied bestaat uit kommen, die gescheiden worden door wegen en secundaire waterkeringen. Inundatie van het achterland begint met een inundatie van de kom direct achter de bres. Pas wanneer de binnenwaterstand de waterkerende hoogte van de randen van deze kom overschrijdt zal de rest van de polder inunderen. Er bevinden zich echter ook een groot aantal verschillende doorlaten in deze komranden die eerder leiden tot inundatie buiten de eerste kom;
- na het inunderen van het gebied achter de eerste kom stijgt de schade snel. De snelheid waarmee de bres groeit heeft grote invloed op de instroming en daarmee de schadeontwikkeling in de tijd. De belangrijkste factoren in de bresgroei zijn het verval (goed bekend) en het dijk materiaal (minder goed bekend en dus een zeer invloedrijke aanname).

3.5 Reflectie op analyses

De gehanteerde werkwijze in dit hoofdstuk is ervaren als redelijk eenvoudig en goed toepasbaar. Wel worden er een aantal keuzes gemaakt van zeer onzekere, gevoelige parameters met invloed op het resultaat: zoals het groeien van het bres en het stroombeeld in de kom. Beide keuzen hebben hoofdzakelijk invloed op de snelheid van de schadeontwikkeling, niet op de resulterende eindschade (en dus IPO-klasse). De conclusie wordt dus niet beïnvloed door de keuze. Het verschil tussen HIS-SSM en de Waterschadeschatter wordt gezien als de meest fundamentele keuze. De verschillen tussen de modellen zijn niet onverwacht, gezien de achtergrond van de modellen. Toch worden de modellen momenteel als dermate 'black-box' gezien, dat er geen aanbeveling wordt gedaan over welk model geschikter is (voor deze kading of voor regionale waterkeringen algemeen). Een nadere analyse van de toepasbaarheid van de modellen wordt aangeraden.

4

MAATREGELEN WATERSYSTEEM

In dit hoofdstuk is onderzocht of en op welke wijze de gevolgen van een overstroming kunnen worden beperkt door het nemen van maatregelen tijdens dreigende hoogwatersituaties of bij doorbraak van de kering. Voor het pilotgebied zijn 2 maatregelen onderzocht:

- compartimentering van het achterland;
- compartimentering buitenwater.

In dit hoofdstuk is alleen gekeken naar maatregelen die kunnen worden genomen voorafgaand aan hoogwater. Noodmaatregelen, maatregelen na het ontstaan van een bres, zijn in theorie ook mogelijk. Gezien de beschikbare tijdsduur (op basis van 2 schadeberekeningen in hoofdstuk 2 stijgt de schade binnen circa 12 tot 48 uur naar IPO-klasse III) lijken dergelijke noodmaatregelen ook niet kansrijk in het significant reduceren van het overstromingsrisico. Voor het succesvol toepassen van een noodmaatregel dient achtereenvolgens alarmering, mobilisatie en plaatsing uitgevoerd te worden en zal de maatregel technisch stabiel moeten zijn. De breslocatie (bres van tientallen meters, op basis van hoofdstuk 3) is daarnaast naar verwachting moeilijk bereikbaar over een smalle polderdijk. Noodmaatregelen zoals het tijdig dichten van een bres zijn daarom niet beschouwd.

4.1 Compartimentering achterland

Uit hoofdstuk 3 is gebleken dat de ontwikkeling van de schade in de tijd sterk afhankelijk is van de hoogteligging in het achterland. Voor beide breslocaties begint de schade sterk op te lopen zodra de eerste kom achter de bres 'doorbreekt'. Als kan worden voorkomen dat deze kommen doorbreken of overlopen, dan kan de schade in het achterland mogelijk worden gereduceerd. Dit kan mogelijk leiden tot een lagere IPO-klasse voor (delen van) het pilotgebied.

4.1.1 Meerlaagse waterveiligheid

Het compartimenteren van het pilotgebied is een vorm van meerlaagse waterveiligheid. Meerlaagse waterveiligheid is een risicobenadering die bestaat uit 3 lagen:

- de eerste laag is preventie, het zoveel mogelijk voorkomen van een overstroming;
- de tweede laag richt zich op het realiseren van een duurzame ruimtelijke inrichting van ons land;
- de derde laag zet in op een betere (organisatorische) voorbereiding op een mogelijke overstroming.

Compartimentering vormt de tweede laag binnen meerlaagse waterveiligheid. De ruimtelijke inrichting van de kadering kan worden ingezet om het overstromingsrisico te reduceren door de optredende schade te beperken. Op deze wijze wordt het overstromingsrisico verlaagd. Zodra een verlaging van het overstromingsrisico wordt gebruikt voor de afschaling van een IPO-klasse, dan is dit in feite een herverdeling van de waterveiligheid van de eerste laag naar de tweede laag. Het gevolg is dat er een hogere overstromingsfrequentie wordt toegestaan, omdat de gevolgen van een dergelijke overstroming kleiner zijn. Het toestaan van een hogere overstromingsfrequentie is echter onderdeel van een complexe maatschappelijke discussie buiten de scope van voorliggend rapport (zie kader). In dit rapport wordt enkel gekeken naar de mogelijk waarde van een dergelijk herverdeling.

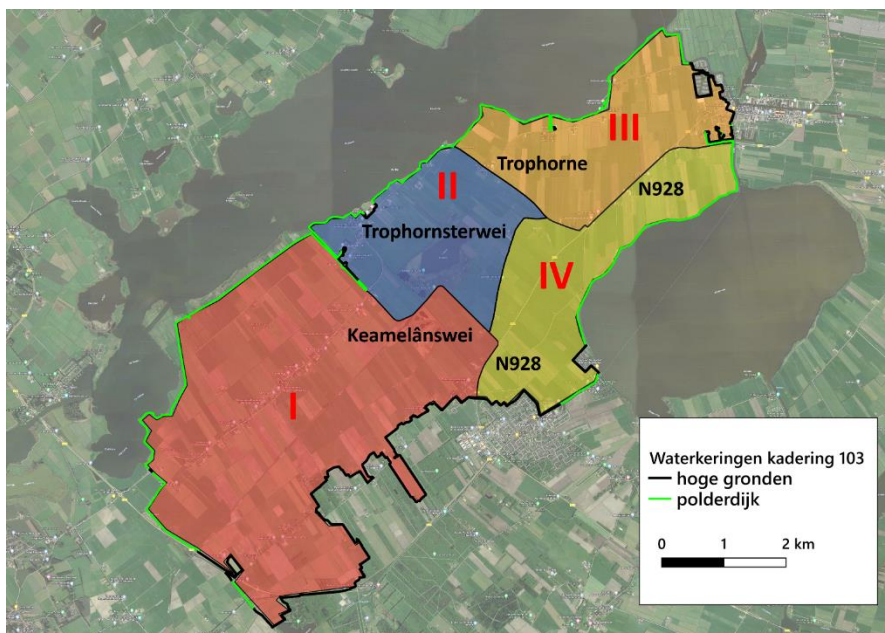
Meerlaagse waterveiligheid en toelaatbare overstromingskans (Advies Waterveiligheid Limburg ENW, d.d. 19 oktober 2020)

'Waterveiligheid wordt gezien als een basisvoorwaarde voor welzijn en welvaart, [een heroverweging van de overstromingskans] kan zich daarom niet beperken tot de technische of bestuurlijke dimensies. [Er wordt benadrukt] dat de keuze om al dan niet over te gaan tot zo'n heroverweging, vraagt om bredere maatschappelijke betrokkenheid bij die discussie. De acceptatie van een hogere overstromingskans heeft niet alleen te maken met maatschappelijke sentimenten rond veiligheid, gelijkheid en solidariteit, maar ook met de mate waarin de spelers in de ruimtelijke ordening en crisis- en calamiteitenzorg in staat en bereid zijn de consequenties ervan, in de vorm van een groter aandeel in de risicobeheersing, te nemen.'

4.1.2 Compartimentering van het pilotgebied

Het achterland van het pilotgebied is opgedeeld in 4 compartimenten (I tot en met IV). De scheidingslijnen tussen de compartimenten worden gevormd door regionale wegen die reeds aanwezig zijn in het gebied en die momenteel al hoger liggen dan de rest van het achterland vanwege het grondlichaam onder de weg (variërend van circa 0,5 m á 0 m onder toetspeil). Deze wegen worden momenteel niet als waterkering onderhouden, maar zijn wel onderhevig aan eisen vanuit hun eigen gebruiksfunctie als regionale weg. De compartimenten zijn weergegeven in afbeelding 4.1.

Afbeelding 4.1 Compartimentering achterland pilotgebied (I tot en met IV) in rood en namen compartimenterende wegen in zwart



Voor het onderzoeken van de kansrijkheid van compartimenteren als maatregel is aangenomen dat deze wegen minimaal tot NAP +0,5 m worden opgehoogd, waardoor een inundatie van een van de compartimenten tot toetspeil beperkt kan blijven tot het desbetreffende compartiment. Er is een marge van 0,5 m boven toetspeil gehanteerd op basis van de Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, tabel D.1 [ref. 20]. Er is ook aangenomen dat er geen doorlaatmiddelen aanwezig zijn in of door deze compartimentscheidingen (dit is een gunstig uitgangspunt). In tabel 4.1 is de maximale schade per compartiment weergegeven als deze inundeert tot toetspeil. Deze schade is berekend door een waterstand van NAP (toetspeil) aan te nemen in het compartiment. Daarnaast is de IPO-klasse weergegeven waarin deze schade zou vallen als het compartiment als separate kadering zou worden geclassificeerd.

Tabel 4.1 Schade en IPO-klasse per compartiment en totaal

Compartiment	Beschrijving	Schade [EUR]	IPO-klasse	Lengte huidige waterkering* [km]
I	gecompartimenteerd door de Keamelânswei en de N928	23.000.000	II	9,2
II	gecompartimenteerd door de Keamelânswei, de Trophornsterwei en de Trophorne	7.600.000	I	3,8
III	gecompartimenteerd door de Trophorne en de N928	7.700.000	I	7,3
IV	gecompartimenteerd door de N928 en de Trophornsterwei	6.600.000	I	5,7
totaal		45.000.000	III	26,0

* Exclusief hoge gronden.

Indien de Keamelânswei (3,0 km), de N928 (3,7 km), de Trophorne (2,6 km) en de Trophornsterwei (2,3 km) worden opgehoogd tot een compartimenterende waterkering (totaal 11,6 km), dan kan het pilotgebied worden opgesplitst in 4 compartimenten met lagere IPO-klassen dan de totale kadering. De huidige IPO-klasse van de in totaal 26 km waterkering (hoge grond niet meegerekend) is IPO III, waarvan potentieel:

- 9,2 km (de waterkering rondom compartiment I) kan worden afgeschaald van IPO III naar IPO II;
- 16,8 km (de waterkering rondom compartimenten II, III en IV) kan worden afgeschaald van IPO III naar IPO I.

Het functioneren van de wegen als compartimenterende waterkering leidt tot directe kosten (de kosten van een ophoging van circa 0,5 tot 1 m) en indirecte kosten (de kosten van het onderhoud als waterkering). De wegen worden momenteel echter ook al onderhouden vanuit de primaire functie (als weg). Mogelijk leidt dit momenteel al tot eisen met betrekking tot het grondlichaam, waardoor deze mogelijk reeds kan functioneren als waterkering. Het grondlichaam van een weg mag immers ook niet afschuiven wanneer er een hoge freatische lijn aanwezig is (voor het grondlichaam van een weg zou dit bijvoorbeeld door neerslag kunnen komen, in tegenstelling tot door een waterstand tegen het grondlichaam). Hierbij wordt opgemerkt dat de weg naar verwachting niet uit klei bestaat. De wegen hebben een breedte van circa 3,0 m per rijstrook. De kruin van een dergelijk grondlichaam (2 rijstroken, 7 m) is dan significant breder dan de kruinbreedte die is vereist van een regionale waterkering (1,5 m). De kostenefficiëntie van compartimentering van het achterland is beschouwd in paragraaf 7.6.

4.1.3 Onderhoudbaarheid compartimenterende dijken ten opzichte van regulier dijken

Een compartimenterende waterkering verdient extra aandacht met betrekking tot beheer en onderhoud. De waterkering is namelijk niet als zodanig herkenbaar in het landschap. Dit leidt er in de praktijk mogelijk toe dat de waterkering minder goed onderhouden wordt of dat deze (onbedoeld) verzwakt wordt door derden. Hierbij kan worden gedacht aan de volgende situaties (niet-uitputtende voorbeelden):

- overige beheerders (zoals de wegbeheerder) kunnen mogelijk werkzaamheden uitvoeren (zoals een afgraving) zonder te realiseren dat er in een beschermings- of kernzone gewerkt wordt;
- waterkeringbeheerders kunnen tijdens inspecties mogelijk minder focussen op compartimenterende waterkeringen, omdat de nadruk ligt op de reguliere waterkeringen;
- omwonenden voeren afgravingen uit of leggen NWO's aan rondom of door de waterkering zonder dat zij door hebben dat ze in de (vergunningsplichtige) beschermings- of kernzone werken.

Bovenstaande voorbeelden kunnen worden ondervangen door correcte handhaving van het toekomstig beleid en regelgeving, maar de praktijk leert dat er rekening dient te worden gehouden met meer (mogelijk onbedoelde) misstanden. Dergelijke verzwakking van de compartimenterende dijk is niet nader beschouwd in voorliggend rapport.

4.2 Compartimenteren buitenwater

Het compartimenteren van een watersysteem kan op 2 manieren worden ingezet om het overstromingsrisico van een gebied te beperken:

- 1 een compartimenteringswerk kan de hydraulische belasting in een gebied beperken door watersystemen af te sluiten van een aandrijvende kracht (zoals het beperken van opwaaiing). Een voorbeeld is een scheidingsdam in een meer (zoals de Houtribdijk op grotere schaal);
- 2 een compartimenteringswerk kan de gevolgen van een dijkbres verminderen door de hoeveelheid water die kan instromen te beperken.

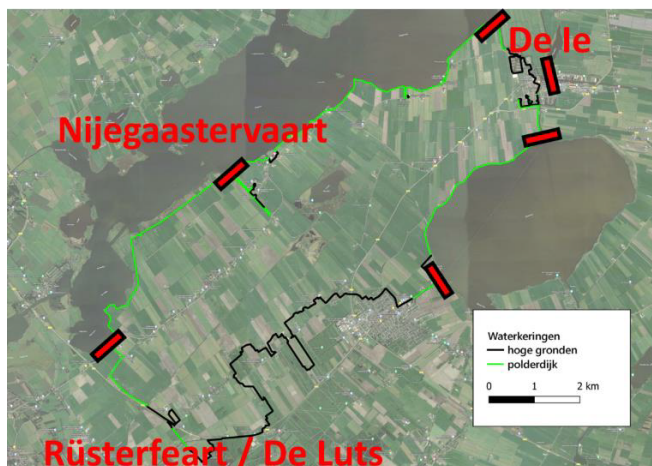
In dit rapport wordt alleen de tweede functie beschouwd, het limiteren van de hoeveelheid buitenwater dat kan instromen. Het beperken van de hydraulische belasting dient op grotere schaal (boezemniveau) beschouwd te worden. Een compartimenteringswerk kan daarnaast worden ingezet ten behoeve van de waterkwaliteit, bijvoorbeeld door vervuiling beperkt te houden tot een kleiner gebied. Deze functie wordt niet beschouwd in dit rapport. Het compartimenteren van een buitenwater is een vorm van meerlaagse waterveiligheid, zoals eerder beschouwd in paragraaf 4.1.1 en daarmee onderhavig aan dezelfde maatschappelijke discussies.

4.2.1 Mogelijke locaties compartimentering

In de meest ideale situatie kunnen rondom het bres compartimenteringsmiddelen (zoals een keersluis) worden ingezet en blijft het instromend volume daardoor beperkt. Dit is zodoende vooral kansrijk als het buitenwater bestaat uit een watergang en minder als het buitenwater bestaat uit een groter lichaam zoals een meer. Voor het pilotgebied is compartimentering daarom over de volgende strekkingen mogelijk:

- de Nijegaastervaart richting Elahuizen tussen:
 - slechts 1 compartimenteringswerk nodig aan de monding met het Fluessen;
 - reduceert het overstromingsrisico voor circa 3 km polderdijk en circa 0,9 km hoge grondkering;
- de Ie ten noordoosten van de kadering:
 - 3 compartimenteringswerken nodig, aan de monding met het Fluessen, aan de monding met het Slotermeer en ter plaatse van de watergangen richting het noorden en westen (hier is aangenomen dat deze met 1 compartimenteringsmiddel beide afgesloten kunnen worden);
 - reduceert het overstromingsrisico voor circa 2,5 km polderdijk en circa 4 km hoge grondkering;
- de Rusterfeart/de Luts ten zuiden van de kadering:
 - 2 compartimenteringswerken nodig, aan de monding met het Fluessen en aan de monding met het Slotermeer;
 - reduceert het overstromingsrisico voor circa 3,4 km polderdijk en circa 15,6 km hoge grondkering.

Afbeelding 4.2 Mogelijke compartimentering buitenwater rondom de Nijegaastervaart, de Ie en de Rusterfeart/de Luts



Gegeven het beperkte aantal kilometers aan de polderdijk waarvan het overstromingsrisico kan worden beperkt door compartimentering van het buitenwater, lijkt compartimentering van De Le en van de Rusterfeart/de Luts geen kostenefficiënte maatregel. Het relatief hoge aantal kilometers hoge grond langs deze strekkingen leidt er bovendien toe dat de nevenschade als gevolg van compartimentering van deze strekkingen relatief hoog is (hoge grond kan niet inunderen, maar een snelle daling van de buitenwaterstand leidt bij hoge grond wel tot mogelijke schade door buitenwaartse instabiliteit). Compartimentering van de Nijegaastervaart lijkt kansrijker en is nader beschouwd.

N.B. Er dient wel te worden opgemerkt dat de compartimenteringswerken ter plaatse van de Le en de Rusterfeart/de Luts ook een effect (zowel positief of negatief) kunnen hebben op de waterkeringen aan de overkant van de watergang (onderdeel van de aangrenzende kaderingen) en de directe omgeving rondom het pilotgebied. Deze mogelijk effecten zijn niet beschouwd in voorliggend rapport.

4.2.2 Effect compartimentering op bres Nijegaastervaart

Een compartimenteringswerk aan de monding van de Nijegaastervaart betekent dat er circa 25.000 m² buitenwater gecompartmenteerd kan worden (de oppervlakte van de Nijegaastervaart). Er is aangenomen dat er een bres is ontstaan in aan de zuidwestzijde van de Nijegaastervaart waardoor de Grote Noordwolderpolder inundeert (vergelijkbaar met breslocatie 1 in hoofdstuk 3).

Alarmering

Er is aangenomen dat een dijkbres gesignaleerd wordt na 4 uur (gunstig uitgangspunt). Na 4 uur staat er zo'n 10 tot 20 cm water in de Grote Noordwolderpolder (afhankelijk van de snelheid waarmee de bres groeit, zie afbeelding 3.8).

Sluitduur

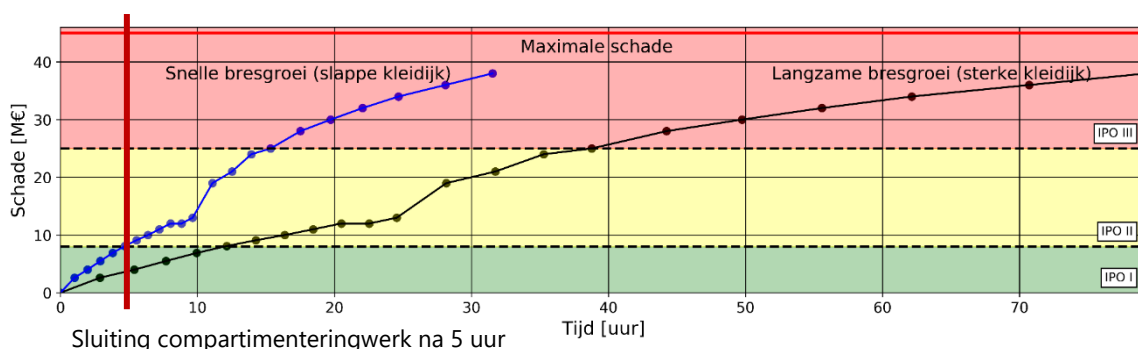
Afhankelijk van het type compartimenteringswerk zal deze binnen 1 uur gesloten kunnen worden als het een op locatie aanwezig type sluitmiddel is (geen schotbalken):

- een klep- of schuifdeur kan binnen circa 15 minuten gesloten worden [ref. 33];
- een balgstuw kan binnen circa 1 uur gesloten worden [ref. 33];
- een systeem van schotbalken heeft een langere sluitduur, omdat deze afhankelijk is van het mobiliseren van personeel, materieel en materiaal [ref. 33]. Daarnaast staat niet vast dat het compartimenteringsmiddel nog goed bereikbaar is na het inunderen van (een deel van) de polder. Een klep-, schuif- of balgstuw kan op afstand worden bediend.

Effect op instroming

Als een compartimenteringswerk binnen 5 uur gesloten kan zijn, dan kan de schade als gevolg van instroming beperkt blijven tot IPO-klasse I. Het resterende water achter het compartimenteringswerk (25.000 m² met een waterdiepte van circa 2 m) is dermate weinig dat dit een verwaarloosbare (rest)stijging van de binnenwaterstand veroorzaakt (< 1 cm).

Afbeelding 4.3 Effect compartimentering op ontwikkeling van de schade



Nevenschade compartimentering Nijegaastervaart

Als gevolg van compartimentering van de Nijegaastervaart zal het waterpeil in het gecompartmenteerde deel snel dalen. Dit is geen neveneffect, maar het doel van de compartimentering. Door het dalen van de buitenwaterstand kan echter schade ontstaan aan de kaden en buitentaluds langs de Nijegaastervaart door instabiliteit. Bij een sluiting van het compartimenteringswerk na 5 uur is de schade in de Grootte Noordwolderpolder reeds opgelopen tot EUR 5.000.000,-- tot EUR 8.000.000,-- (afhankelijk van de snelheid waarmee de bres groeit). De schade als gevolg van de snelle daling van de buitenwaterstand is niet berekend, maar het is onwaarschijnlijk dat de totale schade onder EUR 8.000.000,-- (IPO-klasse I) blijft.

Effect compartimentering op achterliggende waterkeringen en kosten compartimentering

Als gevolg van de compartimentering van de Nijegaastervaart kunnen de waterkeringen in het gecompartmenteerde gebied worden afgeschaald van IPO-klasse III naar IPO-klasse II. Het is niet waarschijnlijk dat de investeringskosten en onderhoudskosten van een compartimenteringsmiddel (ordegrootte enkele miljoenen euro's aan investeringskosten en enkele tienduizenden euro per jaar aan onderhoudskosten op basis van expert judgement) een dergelijke investering rechtvaardigen. De kostenefficiëntie van compartimentering van het achterland is beschouwd in paragraaf 7.7.

4.3 Conclusies maatregelen

Op basis van de uitgevoerde analyses wordt geconcludeerd dat:

- compartimentering van het achterland van het pilotgebied is mogelijk als reeds aanwezige wegen worden opgehoogd tot minimaal toetspeil (NAP +0 m) en als kan worden aangetoond dat deze grondlichamen als waterkering kunnen voldoen (voldoende hoogte en stabiliteit);
- compartimentering van het achterland van het pilotgebied kan de schade bij een inundatie van de compartimenten beperkt houden tot IPO-klasse I of II, terwijl de huidige IPO-klasse III is. Een kosten-batenanalyse lijkt kansrijk en is uitgevoerd in paragraaf 7.6;
- het afschalen van de IPO-klasse van (delen van) het pilotgebied leidt tot het toestaan van een grotere kans op een overstroming. Het toestaan van een grotere kans op overstroming is onderdeel van een grotere maatschappelijke discussie en is daarom afhankelijk van meer factoren dan alleen euro's schade;
- compartimentering van het buitenwater is alleen mogelijk bij watergangen en daarom slechts op een beperkte aantal locaties rondom het pilotgebied mogelijk. Het merendeel van het buitenwater rondom het pilotgebied bestaat uit meren;
- compartimentering van het buitenwater kan leiden tot een lager IPO-klasse, maar op basis van de kosten van een compartimenteringswerk en de schade die mogelijk optreedt als gevolg van compartimentering lijkt het onwaarschijnlijk dat een kosten-batenanalyse positief uitvalt, zie paragraaf 7.7

5

MAATGEVENDE EISEN MEDEGEBRUIK

In dit hoofdstuk zijn de eisen beschouwd die vanuit medegebruik aan de waterkering worden gesteld. Medegebruiksfuncties zoals constructieve elementen, natuurfuncties of kabels en leidingen hebben een interactie met de waterkering. In dit hoofdstuk is onderzocht hoe de (veiligheids-)eisen die gelden voor de nevenfuncties zich verhouden tot de eisen vanuit waterveiligheid.

5.1 Faalkans en betrouwbaarheidsindex

Het veiligheidsniveau wordt meestal uitgedrukt in een faalkanseis of betrouwbaarheidsindex. Het verband tussen de betrouwbaarheidsindex en de faalkanseis wordt omschreven door de standaard normale verdeling:

$$\beta = -\phi^{-1}(P_{eis})$$

Waarin:

- β de betrouwbaarheidsindex (met referentieperiode van 1 jaar) [-];
- ϕ^{-1} de inverse van de standaard normale verdeling [-];
- P_{eis} de faalkanseis per jaar [jaar⁻¹].

5.2 Eisen regionale waterkering vanuit de waterveiligheid

De vereiste veiligheid van regionale keringen wordt beschreven met IPO klassen die de maximaal toelaatbare faalkans van de waterkering beschrijven. De toelaatbare doorbraakkansen van boezemkaden zijn gerelateerd aan de overschrijdingskansen van de IPO normering, namelijk 1/5 keer de overschrijdingskans (normfrequenties) [ref. 21].

Voor regionale waterkeringen wordt standaard de volgende faalkansbegroting gehanteerd [ref.21]:

- 80 % aan macrostabiliteit van binnentalud (STBI):
 - voor een IPO III kadeklasse (deze pilot) komt dit neer op een toelaatbare faalkans voor macrostabiliteit van $1,6 * 10^{-3}$ per jaar (betrouwbaarheidsindex van 2,95);
- 10 % aan overloop/golfoverslag (HT/GEKB):
 - voor een IPO III kadeklasse (deze pilot) komt dit neer op een toelaatbare faalkans voor overloop/golfoverslag van $2,0 * 10^{-4}$ per jaar (betrouwbaarheidsindex van 3,54);
- 10 % aan de overige faalmechanismen:
 - voor een IPO III kadeklasse (deze pilot) komt dit neer op een toelaatbare faalkans voor de overige faalmechanismen van $2,0 * 10^{-4}$ per jaar (betrouwbaarheidsindex van 3,54).

Afbeelding 5.1 IPO klasse, norm-frequenties, toelaatbare faalkansen en corresponderende betrouwbaarheidsindices [ref 21]

Kadeclass	I	II	III	IV	V
Normfreq. [1/jr]	1/10	1/30	1/100	1/300	1/1000
Pdoorbr, toel [1/jr]	$2,0 * 10^{-2}$	$6,7 * 10^{-3}$	$2,0 * 10^{-3}$	$6,7 * 10^{-4}$	$2,0 * 10^{-4}$
βT	2,05	2,47	2,88	3,21	3,54

5.3 Eisen regionale waterkering vanuit de Eurocode

De Eurocode is een internationale set van normen voor het ontwerpen en toetsen van bouwconstructies op constructieve veiligheid. Een aantal van de medegebruiksobjecten die geïdentificeerd zijn worden ontworpen volgens de Eurocode. Het gaat hier om constructies zoals bruggen, aquaduct, duikers en gemalen. In de Eurocode-systematiek wordt gebruikt gemaakt van gevolgklassen (CC) om eisen te stellen aan de constructieve betrouwbaarheid van constructies. De gevolgklassen uit de Eurocode zijn gedefinieerd op basis van de gevolgen van bezwijken of slecht functioneren van de constructie. De gestelde betrouwbaarheidseisen (RC) hangen af van de gevolgklasse waarin de constructie in valt.

Afbeelding 5.2 Definitie van gevolgklassen [ref. 22]

Gevolgklasse CC	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

De Eurocode stelt voor alle gevolgklassen minimumwaarden voor de betrouwbaarheidsindex β bij een referentieperiode (ontwerplevensduur) van 1 of 50 jaar. De minimumwaarden zijn weergegeven in afbeelding 5.3. De betrouwbaarheidsindex bepaalt vervolgens met welke partiële factoren de constructie doorgerekend dient te worden.

Afbeelding 5.3 Aanbevolen minimumwaarden voor de betrouwbaarheidsindex [ref 22]

Betrouwbaarheids-klasse RC	Minimumwaarden voor β	
	1 jaar referentieperiode	50 jaar referentieperiode
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

De relatie tussen de 1 en 50 jaar referentieperiode kan bij benadering als volgt worden omschreven mits de faalkansen elk jaar statistisch onafhankelijk zijn [ref. 12] en de faalkansen klein:

$$\phi(-\beta_{1 \text{ jaar}}) \approx \phi(-\beta_{50 \text{ jaar}})/50$$

Bij grote correlatie in het tijdsdomein (bijvoorbeeld wanneer de sterkte van een constructie zeer dominant is ten opzichte van de belasting), dan kan worden gesteld dat de faalkanseis in het eerste jaar vrijwel gelijk is aan de faalkanseis over de eerste 50 jaar):

$$\phi(-\beta_{1 \text{ jaar}}) \approx \phi(-\beta_{50 \text{ jaar}})$$

Waarin:

- ϕ de standaard normaalverdeling [-];
- $\beta_{1 \text{ jaar}}$ de betrouwbaarheidsindex met een referentieperiode van 1 jaar [-];
- $\beta_{50 \text{ jaar}}$ de betrouwbaarheidsindex met een referentieperiode van 50 jaar [-].

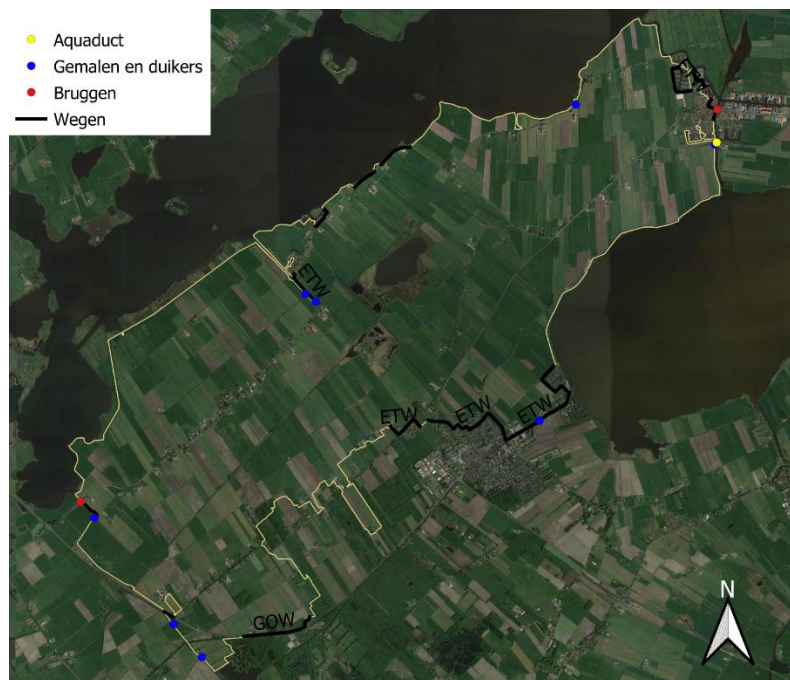
5.4 Vormen van medegebruik

De volgende vormen van medegebruik zijn beschouwd in deze paragraaf:

- wegen over of rondom de waterkering;
- bruggen met brughoofden op waterkering;
- gemalen en duikers door de waterkering;
- aquaduct als onderdeel van de waterkering;
- kabels en leidingen in of rondom de waterkering.

De wegen, bruggen, gemalen en duikers en het aquaduct binnen het pilotgebied zijn weergegeven in afbeelding 5.4.

Afbeelding 5.4 Overzicht medegebruiksobjecten pilotgebied



In de onderstaande paragrafen zijn per vorm van medegebruik de eisen vanuit de gebruiksfunctie vergeleken met de eisen vanuit de waterveiligheid op de waterkering.

5.4.1 Wegen over of rondom de waterkering

Op een aantal plaatsen lopen er wegen op de kruin van de waterkering (weergegeven in afbeelding 5.4). Voor het pilotgebied zijn 2 verschillende typen wegen geïdentificeerd: de erftoegangsweg (ETW) en de gebiedsontsluitingsweg (GOW). De erftoegangsweg is een lokale weg die toegang biedt tot woningen, bedrijven, winkels etc. Op erftoegangswegen mengen verschillende soorten verkeer met elkaar: voetgangers, fietser, auto's en vrachtauto's. De gebiedsontsluitingsweg wordt gebruikt om gebieden aan te sluiten op wegen van hogere orde (autowegen). Op deze wegen worden fietsers en voetgangers niet toegelaten. Aan wegen worden verschillende eisen gesteld voor stabiliteit, vervormingen en afmetingen vanuit de Eurocode en CROW Handboek voor wegontwerp 2013 [ref. 9]. Deze eisen vormen mogelijk de maatgevende eisen waar het dijklichaam (inclusief weg) aan dient te voldoen door de aanwezigheid van deze weg, in tegenstelling tot de eisen en belasting waar de dijk aan dient te voldoen vanuit de waterveiligheid.

Stabiliteit aardebaan

De eisen met betrekking tot de stabiliteit van de aardebaan kunnen direct worden vergeleken met de eisen met betrekking tot de stabiliteit van het dijklichaam. Het primaire mechanisme (de stabiliteit van een taludhelling) is hetzelfde, de belasting is anders. De erftoegangsweg en gebiedsontsluitingswegen kunnen worden ingedeeld in gevolgklasse CC1 voor de geotechnische grondslagen (stabiliteit en vervormingen aardebaan). De indeling in gevolgklasse CC1 is te rechtvaardigen, want in het geval van een afschuiving zal dit geringe gevolgen hebben voor mensenlevens. Ook de economische en sociale gevolgen voor de omgeving zullen gering zijn.

De bijbehorende betrouwbaarheidsklasse is afhankelijk van de mate van afhankelijkheid die wordt aangenomen gedurende de referentieperiode:

- voor geotechnische constructies zijn de faalkansen per jaar in grote mate afhankelijk (wanneer wordt uitgegaan van verwaarloosbare degradatie). In het geval van statistische afhankelijkheid zal de betrouwbaarheidsindex voor de 1 jaar referentieperiode de betrouwbaarheidsindex voor de 50 jaar referentieperiode benaderen. Een betrouwbaarheidsklasse 1 komt dan bij benadering overeen met een vereiste betrouwbaarheidsindex van 3,3 per jaar (zie afbeelding 5.3);
- voor waterbouwkundige constructies zijn de faalkansen per jaar minder afhankelijk, omdat een hoge waterstand meestal het aandrijvende mechanisme is. In het geval van statische onafhankelijkheid zal de betrouwbaarheidsindex voor de 1 jaar referentieperiode een factor 50 strenger zijn dan de betrouwbaarheidsindex voor de 50 jaar referentieperiode. Een betrouwbaarheidsklasse 1 komt dan overeen met een vereiste betrouwbaarheidsindex van 4,2 per jaar (zie afbeelding 5.3).

In beide gevallen is de betrouwbaarheidsindex als gevolg van de weg echter significant strenger dan de betrouwbaarheidsklasse voor macrostabiliteit van de waterkering (2,95 bij IPO-klasse III).

Zettingen

Als maatgevende richtlijn met betrekking tot zettingen van wegen is het CROW rapport Grondwerk en Funderingen aangehouden (de CROW is in beginsel geschreven als aanbevelingen, niet als eisen). Uit het CROW rapport Grondwerk en Funderingen blijkt dat er geen beperkingen worden gesteld aan de grootte van de absolute eindzetting. Aan restzettingen worden kunnen wel eisen gesteld worden (zetting die verwacht mag worden na een vastgestelde periode van 10.000 dagen na ingebruikname):

- voor de gebiedsontsluitingsweg is de maximaal toelaatbare restzetting tussen de 0,05 á 0,2 m;
- voor erftoegangswegen worden grotere restzettingen tot 0,3 m geaccepteerd [ref. 23].

Voor wegen worden er daarnaast eisen gesteld op de langsonvlakheid van de weg in de gebruiksperiode. De langsonvlakheid stelt eisen aan het hoogteverschil in de lengterichting van de weg:

- voor gebiedsontsluitingswegen is de maximale langsonvlakheid 0,2 m over een afstand van 50 m;
- voor erftoegangswegen is de maximale langsonvlakheid 0,3 m over een afstand van 50 m [ref. 23].

Aan regionale keringen worden geen absolute eisen gesteld aan toelaatbare zettingen, maar er moet wel rekening mee worden gehouden. Zo moet de kruinhoogte voldoende hoog blijven over de levensduur en moet de kering voldoende stabiliteit behouden bij vervormingen. Voor waterkeringen wordt daarom meestal

een overhoogte aangehouden bij de aanleg, afhankelijk van een bodemzakking per jaar. De bodemdaling is afhankelijk van het type ondergrond en wordt meegenomen in het ontwerp van de kering. Vanuit beide functies (weg en/of waterkering) worden eisen gesteld met betrekking tot zettingen. Deze eisen kunnen echter niet direct worden vergeleken, omdat deze anders worden beoordeeld:

- voor een weg is de (rest)zetting maatgevend;
- voor een waterkering is de resterende hoogte **na** zetting maatgevend.

De aanwezigheid van een weg op de waterkering leidt tot aanvullende eisen met betrekking tot zettingen. Het bepalen en/of beperken van zetting is echter voor beide gebruiksfuncties relevant en leidt tot raakvlakken in een ontwerp.

Breedte weg en kruinbreedte

In het Handboek wegontwerp worden eisen gesteld aan de minimale en maximale breedte van verschillende type wegen [ref. 9]. De minimale afmetingen voor erftoegangswegen is 5,5 m (2,5 m verharding en 1,5 m berm aan beide zijden). Voor gebiedsontsluitingswegen geldt een minimale verharde breedte van 6,55 m met een obstakelvrije zone van 6 m breed aan beide zijden. In de Leidraad toetsen op veiligheid regionale keringen is vastgesteld dat in het geval van aantasting van de regionale kering, de resterende kruinbreedte op het niveau van de vereiste kruinhoogte minimaal 1,5 m dient te zijn. De vereiste minimale wegbreedte is zodoende veel breder dan de minimaal vereiste kruinbreedte voor waterveiligheid. Als er een weg over de kruin van een regionale waterkering loopt, dan is het wegontwerp maatgevend voor de kruinbreedte.

5.4.2 Bruggen met brughoofd op kering

Er zijn 2 bruggen binnen het pilotgebied die raakvlak hebben met de regionale kering (Afbeelding 5.4). Volgens de Eurocode worden bruggen ingedeeld in de gevolgklassen afhankelijk van het type verkeer en de beheerder. Voor het pilotgebied zijn 2 bruggen geïdentificeerd die interactie hebben met het pilotgebied. Deze bruggen zijn beide lokaal en worden ingedeeld in gevolgklasse CC1. Bruggen worden ingedeeld in verschillende gevolgklassen. Een brug valt onder gevolgklasse CC1 indien [ref 24]:

- de brug niet ligt in een economisch belangrijke route;
- het aantal vrachtwagens minder dan 2.000 per jaar per rijstrook is;
- **en** er een beperkt risico op grote maatschappelijke of letselschade is.

Bruggen worden ingedeeld in gevolgklasse CC3 in geval de brug over een hoofdweg, hoofdvaarweg en landelijke spoorweg loopt. Overgebleven bruggen worden ingedeeld in gevolgklasse CC2 [ref 24]. Voor bruggen wordt onderscheid gemaakt tussen de brugconstructie en het brughoofd:

- de brugconstructie dient te voldoen aan de gevolgklassen uit de Eurocode. Deze eisen hebben betrekking op de constructieve veiligheid van de brugconstructie. Deze brugconstructie zelf heeft normaliter nauwelijks interactie met de kering (mogelijk staat de draagconstructie in de beschermingszone / het voorland);
- de brughoofden liggen geregeld in de beschermingszone van de regionale waterkering, dus is er sprake van medegebruik. Voor brughoofden gelden er eisen aan maximale verzakkingen, vergelijkbaar met de zettingen beschouwd voor wegen in paragraaf 0.

Tot slot worden er eisen gesteld aan de hoogte van bruggen. De hoogte van de brug is gerelateerd aan de doorvaarthoogte die voor de watergang wordt gehanteerd. Bij de brug in Woudsend is het brughoofd aangesloten op een aardebaan om een geleidelijk talud voor de weg naar de brug te waarborgen. De vereiste doorvaarthoogte van de brug is significant hoger dan de hoogte van de waterkering. Het grondlichaam van de aardebaan is daarom ook hoger dan de regionale kering. Zettingen van het brughoofd of aardebaan leiden daarom niet direct tot een reductie van de kerende hoogte de waterkering.

In het CROW-rapport Grondwerk en Funderingen worden daarnaast extra strenge eisen gesteld aan de toelaatbare zakking van een steunpunt van een brug. Na plaatsing van het brugdek mag het steunpunt niet meer dan 0,05 m zakken en mag het zakkingsverschil tussen 2 opeenvolgende steunpunten niet meer dan 0,03 m bedragen. De eisen met betrekking tot het brughoofd leiden over het algemeen tot strengere eisen met betrekking tot kerende hoogte en zettingen dan de eisen voor een waterkering. Er dient wel te

worden opgemerkt dat dit vaak enkel geldt voor beperkte strekkingen van de waterkering (de aardebaan richting de brug).

5.4.3 Gemalen en duikers door de waterkering

Een gemaal of duiker door een waterkering is onderdeel van de waterkering en als deze de waterkerende lijn doorkruist dan dient deze vanuit waterveiligheid te worden beschouwd als een waterkerende constructie. Een dergelijke waterkerende constructie dient te voldoen aan de relevante eisen voor hoogte, piping, sterkte, stabiliteit en betrouwbaarheid sluiten (een gemaal of duiker door een waterkering zal altijd voorzien dienen te zijn van een afsluitmiddel), volgens vigerende leidraden (zoals de WOWK). Een gemaal of duiker is ook een constructie die dient te voldoen aan de eisen vanuit de Eurocode. Volgens de Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken van Rijkswaterstaat [ref. 11] vallen duikers, gemalen en stuwen onder natte kunstwerken en dienen deze te voldoen aan de eisen in NEN-EN 1990, NEN-EN 1990/A1 en NEN-EN 1990/NB. De constructie moet volgens deze richtlijnen als brug worden beschouwd en het constructieve veiligheidsniveau bij moet voldoen aan gevolgklasse CC3, bij een referentieperiode van 100 jaar.

Een veiligheidsniveau dat voldoet aan gevolgklasse CC3 zal naar verwachting leiden tot significant strengere eisen voor de constructie dan de eisen voor een IPO-III klasse waterkerende constructie. Het is echter de vraag of veiligheidsniveau dat voldoet aan gevolgklasse CC3 past bij een duiker of gemaal door een regionale waterkering. Deze (op het oog) strenge eis lijkt opgesteld voor primaire waterkeringen en constructies die onderdeel zijn van een hoofdwatersysteem en is mogelijk onnodig streng voor een regionale waterkering.

5.4.4 Aquaduct als onderdeel van de waterkering

Aquaducten vallen volgens de Eurocode onder tunnels. Tunnels in en onder hoofdwegen en hoofdvaarwegen worden ingedeeld in gevolgklasse CC3 [ref. 11]. Het aquaduct in het pilotgebied maakt geen deel uit van een hoofdvaarweg en kan daarom worden ingedeeld in gevolgklasse CC2. Een indeling in gevolgklasse CC1 is niet passend, aangezien falen van de constructie aanzienlijke gevolgen kan hebben voor mensenlevens (hoewel de 'tunnel' heel kort is). Daarnaast is er economische schade: er is geen weg- en vaarverkeer meer mogelijk.

De wanden van het aquaduct zijn aan beide kanten aangesloten op de regionale waterkering. Er is zodoende sprake van medegebruik. Tunnels met wegverkeer worden overwogen ontworpen voor een ontwerplevensduur van 100 jaar [ref 11]. Voor het aquaduct wordt ervan uitgegaan dat de faalkansen elk jaar statistisch onafhankelijk zijn. De Eurocode definieert de betrouwbaarheidsindex voor een ontwerplevensduur van 50 jaar. Om te corrigeren voor de langere ontwerplevensduur kunnen de eisen voor 100 jaar worden afgeleid middels dezelfde betrouwbaarheidsindex, maar door te rekenen met een correctiefactor op de partiele factoren (strenger). Voor een gevolgklasse CC2 wordt een minimale betrouwbaarheidsindex aangehouden van 4,7 voor een 1 jaar referentieperiode. De constructieve eisen van het aquaduct zijn dus maatgevend t.o.v. de eisen van de regionale waterkering van IPO klasse III (zelfs zonder correctiefactor voor levensduur op de partiele factoren).

5.4.5 Kabels en leidingen

Voor het pilotgebied zijn tijdens de meest recente versterkingswerkzaamheden de kabels en leidingen nabij de versterkingslocaties in kaart gebracht door Wetterskip Fryslân. Er zijn meerdere kruisende datakabels, rioolbuizen, waterleidingen en hogedruk leidingen. Ook lopen er meerdere waterleidingen en riool buizen voor langere stukken parallel aan de waterkering. Voor eisen met betrekking tot kabels en leidingen in of nabij waterstaatswerken bestaat een specifieke Eurocode: NEN 3651. Deze eisen gelden voor kabels en leidingen die binnen de veiligheidszone van een waterstaatswerk vallen en zijn gedefinieerd op basis van het type leiding, medium en druk. De NEN 3651 maakt onderdeel uit van het ontwerp en de beoordeling van

leidingen voor primaire waterkeringen (kabels hebben in principe een verwaarloosbare invloed op waterkeringen). Voor regionale waterkering is deze nog niet voorgeschreven, maar de methodieken zijn naar verwachting goed toepasbaar.

5.5 Conclusies medegebruik

Voor medegebruikseisen wordt geconcludeerd dat:

- de eisen vanuit de waterveiligheid en de eisen vanuit het medegebruik (vooral beschreven in de Eurocode) leiden tot veiligheidseisen met betrekking tot de betrouwbaarheidsindex van verschillende orden (factor 10 in faalkans);
- de eisen met betrekking tot medegebruik zijn geregeld strenger dan de eisen met betrekking tot de waterveiligheid;
- met name de aanwezigheid van een weg op de waterkering leidt tot eisen met betrekking tot de stabiliteit en de breedte van het grondlichaam die maatgevend zijn als de waterkering in IPO-klasse IV of lager valt.

Hierbij wordt opgemerkt dat:

- de vergelijking steeds is uitgevoerd op het niveau van de betrouwbaarheidseisen die ten grondslag liggen aan de te hanteren rekenregels. Door verschillen in de vertaling van betrouwbaarheidseisen naar rekenregels (bijvoorbeeld verschillende materiaalmodellen), kunnen er op het niveau van de rekenregels of de praktijk verschillen zijn die je niet zou verwachten op grond van verschillen in betrouwbaarheidseisen;
- bij het ontwerp van een kunstwerk op basis van Bouwbesluit (Eurocodes) wordt de ontwerpverificatie voor aanleg uitgevoerd. Er wordt geen periodieke beoordeling uitgevoerd, zoals in het kader van de IPO-systematiek. Zaken die bij het ontwerp onzeker waren en/of die niet voorzien waren, kunnen ertoe leiden dat het actuele beeld van de betrouwbaarheid ongunstiger is dan ten tijde van het ontwerp. Met andere woorden: het feit dat de Eurocode-nieuwbouweis strenger is, geeft dit geen garantie dat altijd aan de IPO-norm wordt voldaan.

6

OVERSTROMINGSKANS WATERKERING

6.1 Relevante faalmechanismen

In tabel 6.1 is een overzicht gepresenteerd van de verschillende faalmechanismen en de mogelijkheid met betrekking tot de berekening van een faalkans. Een faalkans kan worden berekend met de probabilistische en de semi-probabilistische methodiek. Voor de overige faalmechanismen kan geen faalkans worden berekend, omdat deze deterministisch worden bepaald.

Tabel 6.1 Overzicht faalmechanismen waarvoor een faalkans is te berekenen (cursief = niet relevant voor het pilotgebied)

Faalkans te berekenen		Geen faalkans te berekenen
Probabilistisch	Semi-probabilistisch	Deterministisch
grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)	grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) *
pipng (STPH)	stabiliteit zetsteen (ZST)	microstabiliteit (STMI)
marcostabiliteit binnenwaarts (STBI)	golfklappen op asfaltbekleding (AGK)	grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)
		grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)
		wateroverdruk bij asfaltbekleding (AWO)
Voorlandsporen		
		golfafslag voorland (VLGA)
		afschuiving voorland (VLAF)
		zettingsvloeiing voorland (VLZV)
Kunstwerksporen en NWO's		
hoogte kunstwerk (HTKW)		pipng bij kunstwerk (PKW)
betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)		sterkte en stabiliteit kunstwerk, langsconstructie (STKWI)
sterkte en stabiliteit kunstwerk, puntconstructie (STKWp)		niet waterkende objecten (NWO)

* Theoretisch is een probabilistische benadering mogelijk. In de huidige systematiek is deze nog niet beschikbaar. De complexiteit zal zitten in de statistiek van laagwaterstanden.

Binnen het pilotgebied zijn geen voorlanden aanwezig. Het waterkerende kunstwerk (Ee-aquaduct) is geen traditioneel waterkerend kunstwerk waar de kunstwerksporen op van toepassing zijn. NWO's zijn niet beschouwd. Zowel de voorlandsporen als de kunstwerksporen zijn voor het pilotgebied als niet relevant beschouwd. Daarnaast is er binnen het pilotgebied geen zetsteen of asfaltbekleding aanwezig.

6.1.1 Probabilistisch

Voor de faalmechanismen GEKB, STPH, STBI is probabilistisch een faalkans te berekenen.

Hoogte/Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme GEKB kan worden berekend met de software PROMOTOR (Probabilistisch Model Toetspeilen Regionale waterkeringen). Dit is nader beschouwd en uitgewerkt in paragraaf 6.3.

Piping (STPH)

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme STPH kan worden berekend met verschillende methodieken. Gegeven het beperkte verschil tussen dagelijkse waterstanden en toetspeil en de korte duur van het stormverloop is de verwachting dat de faalkans voor STPH verwaarloosbaar is. Het faalmechanisme STPH is niet nader beschouwd.

Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme STBI kan worden berekend met fragility curves. Dit is nader beschouwd en uitgewerkt in paragraaf 6.4.

6.1.2 Semi-probabilistisch

Voor het bekledingsspoor GEBU is een semi-probabilistische faalkans te berekenen als gebruik wordt gemaakt van de veiligheidsfactoren die zijn afgeleid in het kader van het WBI2017 (toetssporengroep 3). De bruikbaarheid van deze veiligheidsfactor is echter discutabel, omdat deze niet zijn gekalibreerd voor regionale waterkeringen en watersystemen. Tevens is de golfbelasting gering ($H_s \approx 0,3$ m) en de stormduur kort. Het faalmechanisme GEBU wordt daarom niet nader beschouwd.

6.1.3 Deterministisch

Voor de deterministische toetssporen en indirecte toetssporen (toetsspoorgroepen 4 en 5) STBU, STMI, GABI, GABU is vooralsnog geen methodiek om de faalkans te berekenen. Deze faalmechanismen worden, in overleg met de opdrachtgever, niet nader beschouwd in deze pilot omdat geen faalkans te berekenen is en daarmee de bijdrage aan de overstromingskans niet is vast te stellen. De mechanismen zijn voor de oefening van deze pilot niet bepalend. En er is ingeschat dat het de conclusies van de deelvraag niet doorslaggevend beïnvloed.

6.2 Werkwijze afhankelijkheden dijkvakken

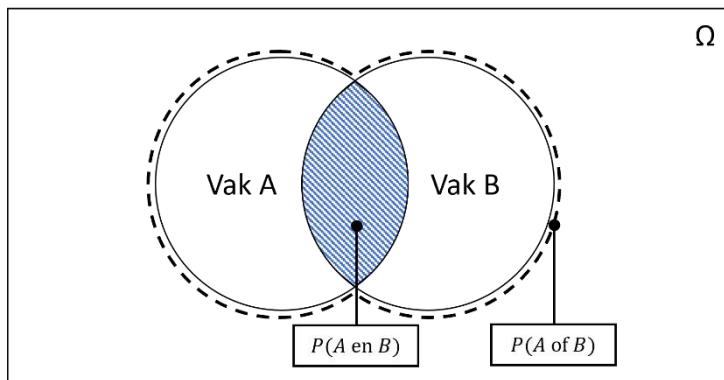
De faalkans van de waterkering wordt bepaald op vakniveau met betrekking tot hoogte en stabiliteit binnentalud. Deze faalkans dient te worden vertaald naar een faalkans van de waterkering op trajectniveau. In afbeelding 6.1 zijn de faalkansen van 2 denkbeeldige vakken (A en B) weergegeven als venndiagram.

De totale kansruimte is gedefinieerd als Ω en beschrijft alle mogelijk uitkomsten. De relatieve oppervlakten van de venndiagrammen van vakken A en B beschrijven de faalkansen van de respectievelijke vakken:

- oppervlakte vak A: de kans dat vak A faalt;
- oppervlakte vak B: de kans dat vak B faalt;
- oppervlakte A of B: de kans dat vak A of vak B faalt (omringd);
- oppervlakte A en B: de kans dat vak A en vak B faalt (gearceerd);

Bij de vertaling tussen faalkansen op vakniveau en de faalkans op trajectniveau is de afhankelijkheid tussen de vakken van belang. De afhankelijkheid tussen de vakken leidt tot een overlap in de faalkans (de kans dat vak A en vak B beiden falen).

Afbeelding 6.1 Venndiagram van de faalkans van 2 denkbeeldige vakken A en B



De kans op falen van vak A of vak B wordt verkregen door de kansen op te tellen en daar de overlap vanaf te trekken:

$$P(A \text{ of } B) = P(A) + P(B) - P(A \text{ en } B)$$

Waarin:

- $P(A \text{ of } B)$ de kans dat vak A of vak B faalt;
- $P(A)$ de faalkans van vak A;
- $P(B)$ de faalkans van vak B;
- $P(A \text{ en } B)$ de kans dat vakken A en B falen.

De kans op falen van beide vakken, $P(A \text{ en } B)$, is in de praktijk echter lastig te bepalen. Er wordt daarom vaak rekening met 2 mogelijke aannamen:

- de vakken zijn volledig exclusief (disjunct): $P(A \text{ en } B) = 0$
- de vakken zijn volledig afhankelijk: $P(A \text{ en } B) = \min(P(A), P(B))$

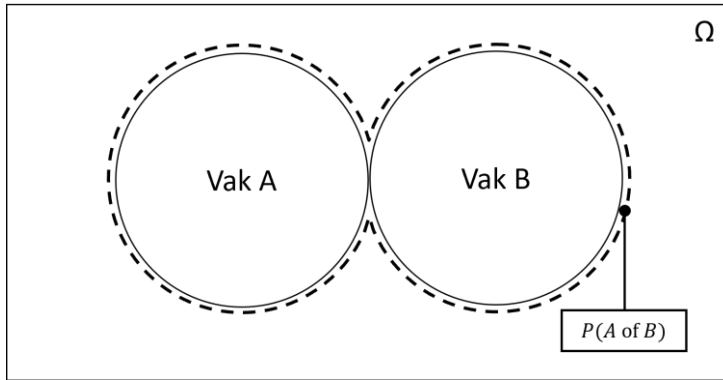
6.2.1 Volledig onafhankelijk (exclusief)

Als de vakken volledig onafhankelijk worden verondersteld dan is de overlap tussen de vakken bij kleine faalkansen verwaarloosbaar. In feite zijn de vakken exclusief en liggen de venndiagrammen naast elkaar zonder overlap (vakken A en B kunnen niet allebei falen). Dit is weergegeven in afbeelding 6.2.

Werkwijze: voor volledig exclusieve (disjunct) vakken wordt de faalkans opgeteld:

$$P(A \text{ of } B) = P(A) + P(B)$$

Afbeelding 6.2 Venndiagram van de kans op falen van vak A of vak B bij volledige exclusiviteit (disjunct)



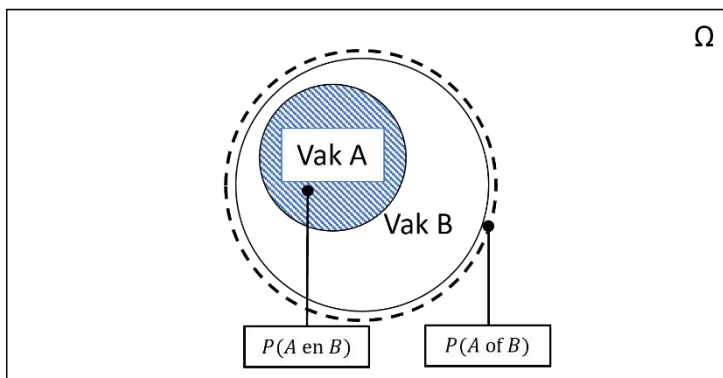
6.2.2 Volledig afhankelijk

Als de vakken volledig afhankelijk worden aangenomen dan liggen de venndiagrammen volledig in elkaar. De overlap in de venndiagrammen is gelijk aan de kleinste van de 2 kansen. Dit is weergegeven in afbeelding 6.3.

Werkwijze: voor volledig afhankelijke vakken wordt de maximale van de faalkansen genomen:

$$P(A \text{ of } B) = \max(P(A), P(B))$$

Afbeelding 6.3 Venndiagram van de kans op falen van vak A of vak B bij volledige afhankelijkheid



6.3 Hoogte

In 2014 is door Wetterskip Fryslân een beoordeling op hoogte uitgevoerd met PROMOTOR. De probabilistische sommen uit PROMOTOR zijn gehanteerd om de overstromingskans van het pilotgebied te bepalen voor hoogte.

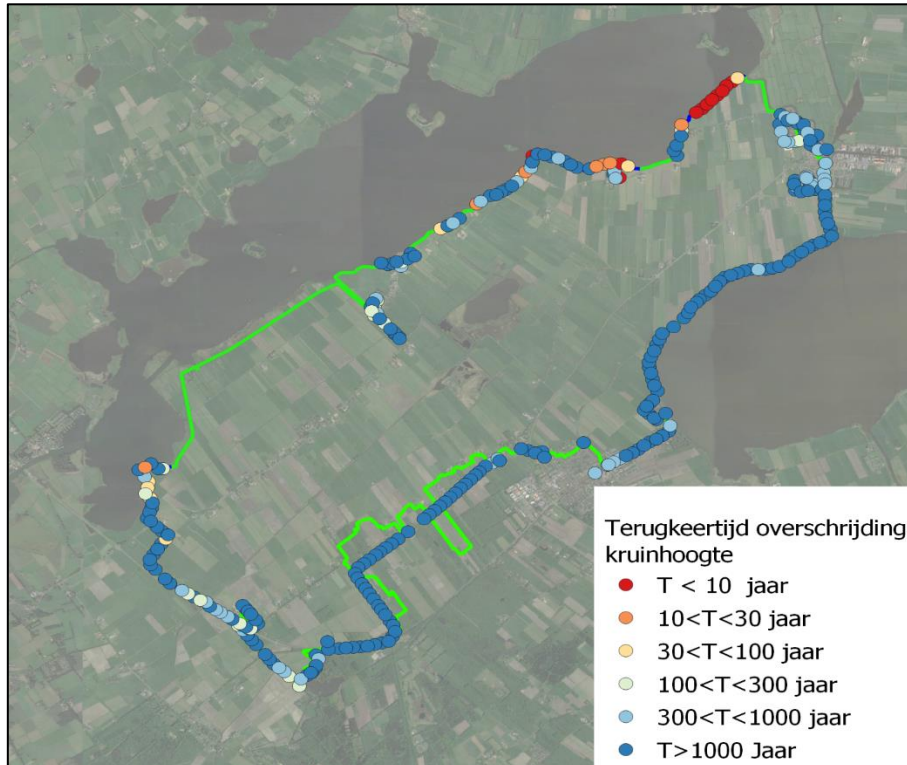
Promotor

PROMOTOR is een probabilistisch model voor het berekenen van toets- of ontwerphoogten van regionale keringen. Het model berekent de hydraulische belasting voor een groot aantal combinaties van boezempeil en windcondities (richting en snelheid). Binnen PROMOTOR wordt aangenomen dat de wind onafhankelijk is van het boezempeil. De combinaties van windrichting en windsnelheid worden wel afhankelijk meegenomen. De opgegeven boezempeil en windstatistiek wordt gecombineerd om het hydraulisch belastingniveau (HBN) te bepalen bij een opgegeven terugkeertijd en kritiek overslagdebiet.

6.3.1 Beoordeling hoogte Wetterskip Fryslân

In afbeelding 6.4 zijn de uitgevoerde PROMOTOR sommen weergegeven. Tijdens de beoordeling door Wetterskip Fryslân is een kritiek overslagdebiet aangehouden van 1 l/s/m. Dit wordt in eerste instantie overgenomen. Op basis van dit kritieke overslagdebiet is de kans berekend dat het HBN hoger is dan de aanwezige kruinhoogte (hetgeen duidt op onvoldoende aanwezige hoogte).

Afbeelding 6.4 Locaties gemaakt promotor berekeningen en terugkeertijd overschrijding van de kruinhoogte



In afbeelding 6.4 is te zien dat de faalkansen het hoogste zijn langs de noordzijde langs het Fluessen en langs de zuidzijde langs de Rijstervaart. Deze secties zijn tussen 2018 en 2020 versterkt. Er is aangenomen dat de secties die zijn versterkt een verwaarloosbare overstromingskansbijdrage hebben en deze PROMOTOR-locaties zijn daarom niet meegenomen.

6.3.2 Werkwijze hoogte

Ter bepaling van de overstromingskans voor hoogte wordt de volgende werkwijze gehanteerd:

- 1 opstellen van een dijkvakindeling met vergelijkbare eigenschappen voor het faalmechanisme hoogte:
 - ligging van de waterkering;
 - oriëntatie van de waterkering;
 - type water waar de kering aan ligt (smalle watergang of meer);
- 2 afleiden maatgevende faalkans per dijkvak (hoogste faalkans binnen het vak uit PROMOTOR);
- 3 vertaling van de faalkans per dijkvak naar de faalkans voor de gehele kadering, rekening houdend met verschillende vormen van afhankelijkheid (zoals beschreven in paragraaf 6.2).

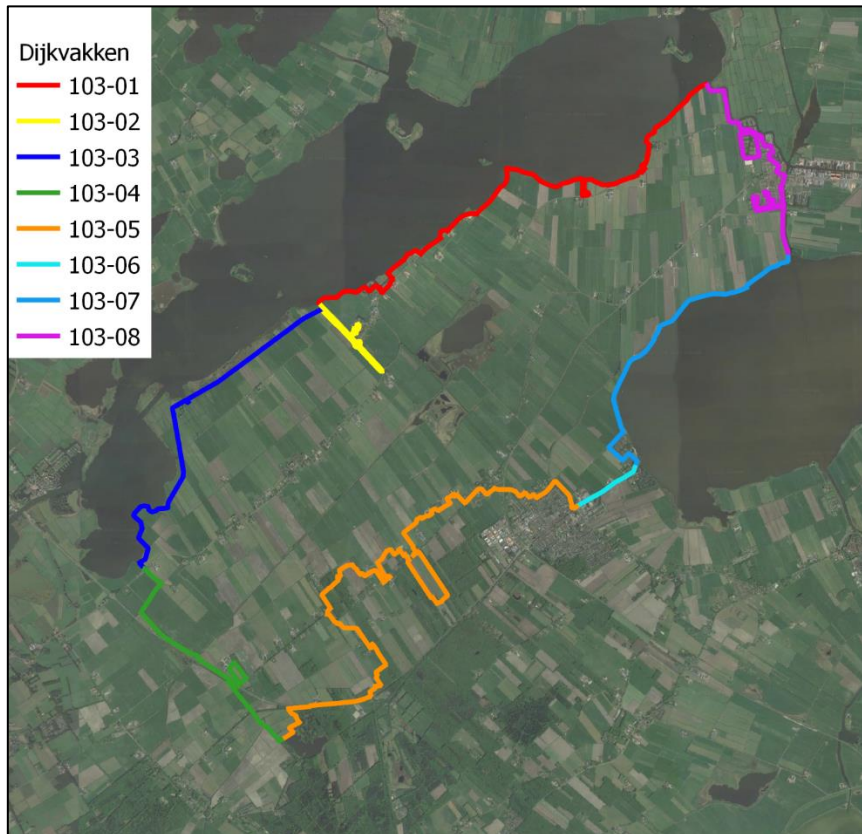
Na deze afleiding wordt de faalkans geduid op basis van een aantal gevoeligheidsanalyses.

6.3.3 Dijkvakindeling

De opgestelde dijkvakindeling is weergegeven in afbeelding 6.5. Hierbij zijn 8 dijkvakken aangenomen:

- dijkvakken 103-01 en 103-03 zijn polderdijken en liggen beide aan het Fluessenmeer;
- dijkvak 103-02 ligt aan de Nijegaastervaart bij Ellahuizen;
- dijkvakken 103-04 en 103-08 die aan een smalle watergang liggen en bestaan hoofdzakelijk uit polderdijken;
- dijkvak 103-05 ligt deels aan een smalle watergang, maar heeft een ander oriëntatie ten opzichte van dijkvak 103-04. Daarnaast bestaat dit vak uit hoge grond, waardoor de sterkte anders is;
- dijkvak 103-06 is een polderdijk en ligt aan een smalle watergang;
- dijkvak 103-07 is een polderdijk en ligt aan het Slotermeer.

Afbeelding 6.5 Dijkvakindeling kadering pilotgebied - hoogte



6.3.4 Overstromingskans per dijkvak

Per dijkvak zijn de aanwezige PROMOTOR berekeningen beschouwd. De maatgevende berekening (hoogste overstromingskans) binnen het vak is opgenomen in tabel 6.2. Alle berekeningen binnen PROMOTOR tonen een faalkans als gevolg van overslag (geen overloop).

Tabel 6.2 Maatgevende doorsneden per dijkvak voor golfoverslag hydraulisch belastingniveau voor 1 l/s/m

Dijkvak	Overschrijdingskans HBN > aanwezige kruinhoogte [per jaar]	Terugkeertijd * [jaar]	Aanwezige kruinhoogte maatgevende locatie * [m+NAP]
103-01	3,66E-2	27	0,31
103-02	5,86E-3	171	-0,07

Dijkvak	Overschrijdingskans HBN > aanwezige kruinhoogte [per jaar]	Terugkeertijd * [jaar]	Aanwezige kruinhoogte maatgevende locatie * [m+NAP]
103-03	3,61E-5	27.701	0,43
103-04	3,41E-3	293	-0,01
103-05	1,32E-3	756	0,05
103-06	1,58E-3	633	0,06
103-07	1,17E-3	851	0,92
103-08	3,02E-4	3.313	0,20

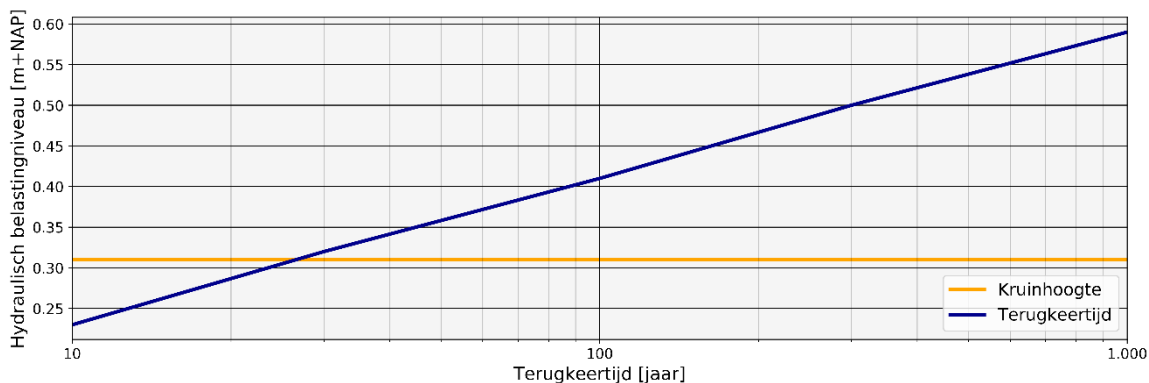
* De aangehouden terugkeertijden en kruinhoogtes zijn exact uit PROMOTOR overgenomen voor de maatgevende doorsnede van het dijkvak. Dit leidt tot een zekere mate van schijn nauwkeurigheid (terugkeertijden op het jaar exact, kruinhoogte op de cm nauwkeurig). Voor de herleidbaarheid van de sommen is echter gekozen om deze waarden exact over te nemen.

In tabel 6.2 zijn grote verschillen te zien tussen de verschillende dijkvakken:

- de grootste overstromingskans is ter plaatse van dijkvak 103-01. Dit wordt verklaard door de ligging ten opzichte van het Fluessen. Tijdens een zuidwester storm zal de scheefstand over het meer richting het noordwesten zorgen voor hogere faalkansen. Daarnaast is in deze richting de strijklengte lang, wat leidt tot potentieel hoge golven;
- de laagste overstromingskans is ter plaatse van dijkvak 103-03. Er is recent versterkt in dit dijkvak en de niet versterkte delen liggen in het zuidelijk deel van het Fluessen. Hier zijn de strijklengtes beperkt.

In afbeelding 6.6 zijn de kruinhoogte en de terugkeertijd van een overschrijding van het HBN voor dijkvak 103-01 weergegeven.

Afbeelding 6.6 Frequentielijn maatgevende doorsnede dijkvak 103-01



6.3.5 Vertaling faalkans dijkvakken naar faalkans dijktraject

De faalkansen op vakniveau dienen te worden gecombineerd tot een faalkans op trajectniveau. Hierbij zijn de volgende opties berekend:

- alle vakken afhankelijk;
- alle vakken onafhankelijk;
- sommige vakken afhankelijk en sommige vakken onafhankelijk.

Alle vakken afhankelijk

Indien alle vakken volledig afhankelijk zijn aangenomen, is de faalkans gelijk aan de grootste van de faalkansen op vakniveau (tabel 6.2), zoals beschreven in paragraaf 6.2. Dit is een optimistische aanpak, want het leidt tot de laagste faalkans op trajectniveau.

Deze aanname vormt zodoende een ondergrens voor de faalkans op trajectniveau:

$$P_{f, \text{Kadering, vakken afhankelijk}} = \max(P_{f, \text{vakken}}) = 3,66\text{E-}2 \text{ per jaar}$$

Alle vakken onafhankelijk

Indien alle vakken onafhankelijk zijn aangenomen, is de faalkans gelijk aan de sommatie van de faalkansen op vakniveau (tabel 6.2), zoals beschreven in paragraaf 6.2. Dit is een conservatieve aanpak, want het leidt tot de hoogste faalkans op trajectniveau. Deze aanname vormt zodoende een bovengrens voor de faalkans op trajectniveau:

$$P_{f, \text{Kadering, vakken onafhankelijk}} = \text{som}(P_{f, \text{vakken}}) = 5,03\text{E-}2 \text{ per jaar}$$

Sommige vakken afhankelijk en sommige vakken onafhankelijk

Op basis van de eigenschappen van de vakken kan de afhankelijkheid tussen de vakken worden gebaseerd op de fysieke eigenschappen. De faalkans ligt tussen de onder- en bovengrens. In deze paragraaf wordt een voorstel gedaan, maar er zijn uiteraard veel meer combinaties mogelijk:

- vakken 103-01 en 103-03 volledig afhankelijk (hierna: 103-01+03);

$$P_{f, \text{vakken 103-01+03}} = \max(P_{f, \text{vakken}}) = 3,66\text{E-}2 \text{ per jaar}$$

- vakken 103-05 en 103-06 volledig afhankelijk (hierna: 103-05+06);

$$P_{f, \text{vakken 103-05+06}} = \max(P_{f, \text{vakken}}) = 1,58\text{E-}3 \text{ per jaar}$$

- vakken '103-01+03', '103-05+06' en alle overige vakken zijn onderling volledig onafhankelijk;

$$P_{f, \text{Kadering, vakken deels afhankelijk}} = \text{som}(P_{f, \text{vakken}}) = 4,89\text{E-}2 \text{ per jaar}$$

Faalkans pilotgebied

De faalkansen van het pilotgebied met betrekking tot hoogte zijn weergegeven in tabel 6.3. Het verschil tussen de verschillende opties is zeer beperkt. Dit wordt verklaard door de dominantie van het vak 103-01. Dit vak heeft een hoge overstromingskans waardoor de overige vakken (ongeacht de afhankelijkheid) een beperkte invloed hebben op de overstromingskans van de gehele kadering.

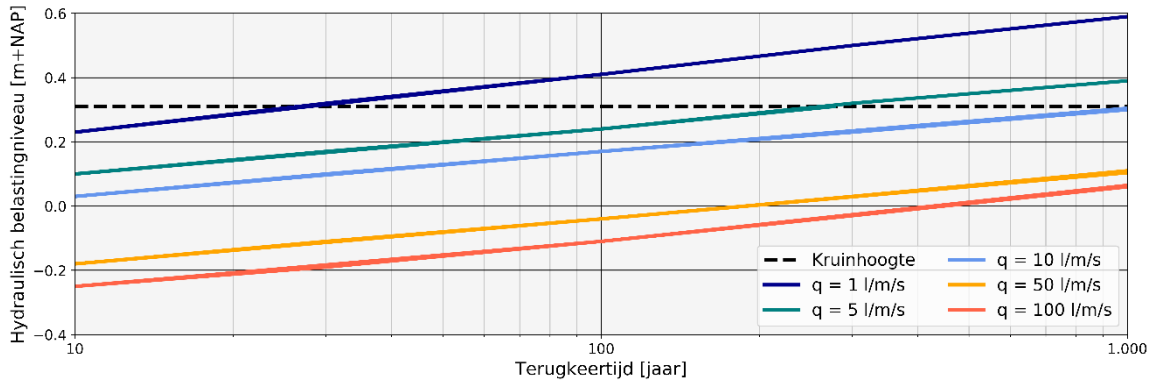
Tabel 6.3 Faalkans pilotgebied met betrekking tot hoogte onder verschillende aannames van afhankelijkheid tussen vakken

Optie	Beschrijving [-]	Faalkans [per jaar]	Terugkeertijd [jaar]
vakken volledig afhankelijk	ondergrens faalkans	3,66E-2	27
vakken volledig onafhankelijk	bovengrens faalkans	5,03E-2	20
sommige vakken afhankelijk, sommige onafhankelijk	tussenin	4,89E-2	20

6.3.6 Gevoeligheidsanalyse kritiek overslagdebiet

Bij de bepaling van de faalkans is uitgegaan van een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m, zoals gehanteerd in de beoordeling van Wetterskip Fryslân. In afbeelding 6.7 zijn de overschrijdingsfrequenties bij hogere overslagdebieten weergegeven voor het maatgevende dijkvak 103-01.

Afbeelding 6.7 Frequentielijnen dijkvak 103-01



De aanwezige kruinhoogte bedraagt NAP +0,31 m. Bij een hoger toelaatbaar overslagdebiet voor dijkvak 103-01 daalt de overstromingskans, zoals weergegeven in tabel 6.4. Het kritieke overslagdebiet is op 2 manieren relevant voor de overstromingskans van de dijk:

- indien het kritieke overslagdebiet schade aan de grasbekleding op het binnentalud veroorzaakt kan dit leiden tot een dijkbres (falen met bezwijken). Bij goed beheer en onderhoud kan worden aangenomen dat een overslagdebiet van 10 l/s/m niet leidt tot schade aan de grasbekleding;
- indien het totale overslagvolume de komberging van het gebied overschrijdt kan dit leiden tot een overstroming (falen zonder bezwijken). In onderstaande paragraaf is een inschatting gemaakt van het kombergend vermogen van het achterland van dijkvak 103-01.

Tabel 6.4 Overstromingskans dijkvak 103-01 bij hogere kritieke overslagdebieten

Kritiek overslagdebiet [l/s/m]	Overstromingskans dijkvak 103-01 [per jaar]	Terugkeertijd [jaar]
1	3,66E-2	27
5	3,61E-3	277
10	9,09E-4	1.100
> 10	<< 9,09E-4	>> 1.100

Kombergend vermogen

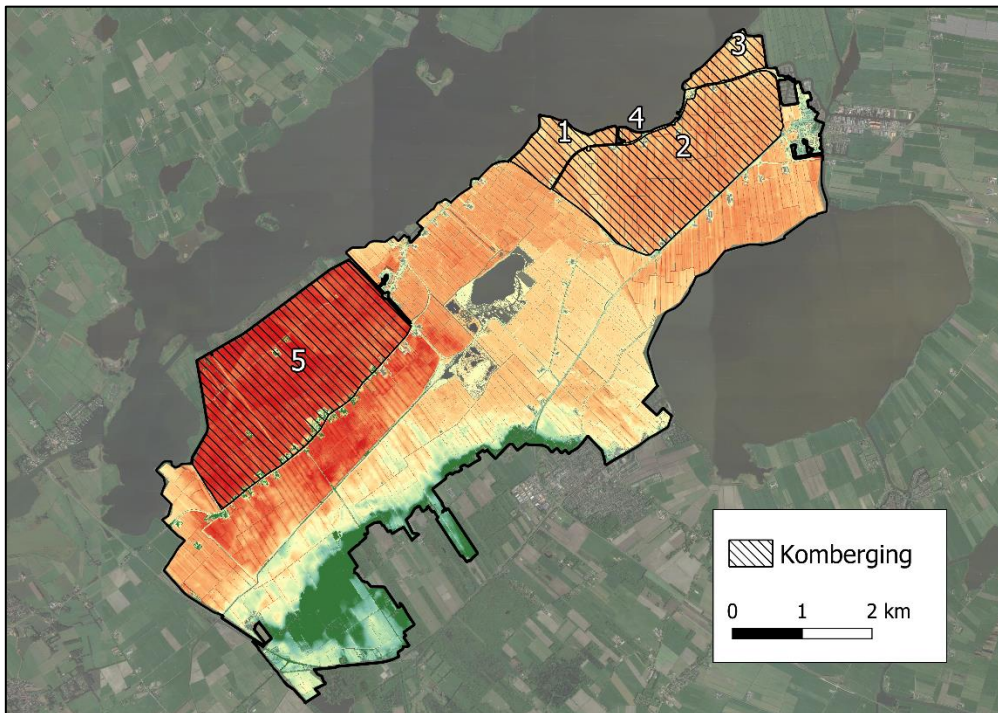
Voor dijkvak 103-01 en 103-03 zijn een aantal kommen binnen de polder geïdentificeerd. Deze gebieden worden omsloten door de boezemkade aan de ene kant en het hoger gelegen grondlichaam aan de andere kant. De beschouwde kommen zijn weergegeven in afbeelding 6.8. Er is gekozen voor een aantal verschillende kommen met betrekking tot maaiveldhoogte, oppervlakte van de kom en oriëntatie.

Per kom is berekend hoelang het duurt voordat een overslagdebiet van 10 l/s/m leidt tot een inundatie. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- bij een binnenwaterstand van 0,2 m boven maaiveld ter plaatse van bebouwing is een kom beschouwd als geïnundeerd. Het maaiveld ter plaatse van de bebouwing ligt vrijwel overal een stukje hoger dan het maaiveld van de weilanden. Voor deze weilanden is zodoende een hogere waterdiepte toelaatbaar geacht. Dit leidt tot de volgende kritieke binnenwaterstanden:

- kom 1 tot en met 4: NAP -0,75 m.
- kom 5: NAP -1,5 m;
- er is aangenomen dat het overslagdebiet langs de gehele waterkering van de kom gelijk is;
- voor kommen met significant verschillende oriëntaties van de dijk normaal wordt niet over de gehele lengte van de boezemkade aangenomen dat er overslag plaatsvindt. Er kan maar voor 1 oriëntatie tegelijk overslag plaatsvinden wat een limiterend effect heeft op de lengte waarover overslag plaatsvindt. Dit effect is duidelijk zichtbaar voor de boezemkade ter plaatse van kom 1;
- in de berekeningen wordt de pompcapaciteit van de gemalen in het gebied niet meegenomen. Aangenomen wordt dat de gemalen gedurende deze omstandigheden worden gebruikt om regen- en kwelwater af te voeren. Het is daarom niet aannemelijk dat een significant deel van de gemaalcapaciteit beschikbaar is om het water afkomstig van overslag weg te pompen. Daarnaast is de pompcapaciteit te laag om een significante invloed te hebben op de berekening;
- de afvoercapaciteit van duikers naar andere kommen is verwaarloosbaar verondersteld. Kommen 1, 2, 3 en 4 zijn met elkaar verbonden door een beperkt aantal duikers met een geringe diameter. Als het instromende water over de kommen verdeeld wordt, stijgt het binnenpeil minder snel. Er is aangenomen dat deze herverdeling niet optreedt. Dit is een conservatieve aanpak, omdat het peil in deze kleinere kommen sneller stijgt als gevolg van het instromende water.

Afbeelding 6.8 Beschouwde kommen



In tabel 6.5 is weergegeven hoelang het duurt voordat de koberging wordt overschreden. Bij een overslagdebiet van 10 l/s/m zijn kommen 1, 3 en 4 binnen een paar uur geïnundeerd. Deze kommen hebben een beperkt oppervlakte ten opzichte van de lengte van de dijk waarover overslag optreedt. In feite zijn deze kommen dus gecompartmenteerd. Hier is een neveneffect van compartimentering te zien: een snelle peilstijging door een beperkt kobergend oppervlakte. In kommen 1, 3 en 4 is echter nauwelijks bebouwing aanwezig, dus de schade als gevolg van de overslag is zeer beperkt. Als wordt aangenomen dat een storm (en dus de overslag) circa 6 uur aanhoudt, dan is een overslagdebiet van 10 l/s/m te hoog voor kommen 1, 3 en 4, maar gezien de beperkte bebouwing lijkt de schade minimaal. Voor kommen 2 en 5 is een overslagdebiet van 10 l/s/m wel toelaatbaar met betrekking tot de koberging.

Tabel 6.5 Berekening duur tot inundatie bij een overslagdebiet van 10 l/s/m

Kom	Oppervlakte [m ²]	Lengte waterkering [m]	Tijd tot inundatie [uur]
1	671.969	1.150	4
2	4.262.704	920	54
3	481.196	1.200	2,5
4	45.073	320	1,4
5	5.524.167	2.600	17

Indien wordt aangenomen dat de duikers die kommen 1, 2, 3 en 4 verbinden wel genoeg capaciteit hebben om het instromende volume te verdelen over de kommen, zal de duur totdat er sprake is van inundatie significant stijgen (tabel 6.6). Deze aanname is echter optimistisch aangezien de capaciteit van de aanwezige duiker verwaarloosbaar is in vergelijking met het instromende volume door overslag.

Tabel 6.6 Berekening duur tot inundatie bij een overslagdebiet van 10 l/s/m indien kommen 1 t/m 4 verbonden zijn

Kom	Oppervlakte [m ²]	Lengte waterkering [m]	Tijd tot inundatie [uur]
1 t/m 4	5.450.942	3.590	16

Een kritiek overslagdebiet van 10 l/s/m lijkt niet toelaatbaar, gezien de snelle peilstijging die dit veroorzaakt in de kommen achter de waterkering. Als kan worden aangetoond dat het overslagdebiet goed verdeeld kan worden over de verschillende kommen, kan mogelijk wel met een hoger overslagdebiet worden gerekend.

Effect hoger overslagdebiet dijkvak 103-01 op boven- en ondergrens overstromingskans op trajectniveau

Bij een aangenomen kritiek overslagdebiet van 10 l/s/m voor dijkvak 103-01 daalt de overstromingskans van dit vak van 3,66E-2 naar 9,09E-4 per jaar. Dit betekent dat de faalkans over de verschillende vakken dichter bij elkaar komen te liggen. De boven- en ondergrens van de overstromingskans van het pilotgebied zijn dan:

- onder aanname afhankelijkheid tussen dijkvakken (ondergrens): 5,09E-3 per jaar (T=196 jaar);
- onder aanname onafhankelijkheid tussen dijkvakken (bovengrens): 1,16E-2 per jaar (T=86 jaar).

Te zien is dat wanneer de overstromingskansen van de verschillende vakken dichter bij elkaar komen te liggen de invloed van de afhankelijkheid groter wordt, dan wanneer de overstromingskans wordt gevormd door 1 dominant dijkvak. In dit geval loont het meer om een aanvullende analyse van de afhankelijkheid uit te voeren.

6.3.7 Gevoeligheidsanalyse waakhogte

Veel regionale waterkeringen hebben een minimale waakhogte tegen overloop. De reden hiervoor is de gevoeligheid van het overloopdebiet voor kleine variaties in overloophogte als gevolg van onzekerheden en/of onnauwkeurigheden. Het toetspeil voor keringen bedraagt circa NAP +0 m. Als wordt aangenomen dat er een minimale waakhogte wordt voorgeschreven van 20 cm als marge tegen overloop, dan dient de kruinhoogte van de waterkering overal minimaal NAP +0,2 m te zijn.

In tabel 6.2 is te zien dat alleen voor dijkvakken 103-02, 103-04, 103-05 en 103-06 de kruinhoogte momenteel onder NAP +0,2 m is. Voor de overige dijkvakken is de huidige kruinhoogte al hoger dan NAP +0,2 m. De overstromingskansbijdrage van dijkvakken 103-02, 103-04, 103-05 en 103-06 is echter heel beperkt. De faalkans van het pilotgebied wordt immer gedomineerd door dijkvak 103-01. Als de kruinhoogte in de dijkvakken 103-02, 103-04, 103-05 en 103-06 wordt opgehoogd om te voldoen aan de minimale waakhogte, dan zal de faalkans van de kading dus nauwelijks lager worden.

De dijkvakken waar een minimale waakhogte van 20 cm tot hogere kruin zou leiden, hebben een hele beperkte invloed op de overstromingskans van het pilotgebied. De overstromingskans van het gebied zal daarom niet wijzigen ten opzichte van paragraaf 6.3.5 als een minimale waakhogte van 20 cm wordt gehanteerd.

6.4 Stabiliteit binnenwaarts

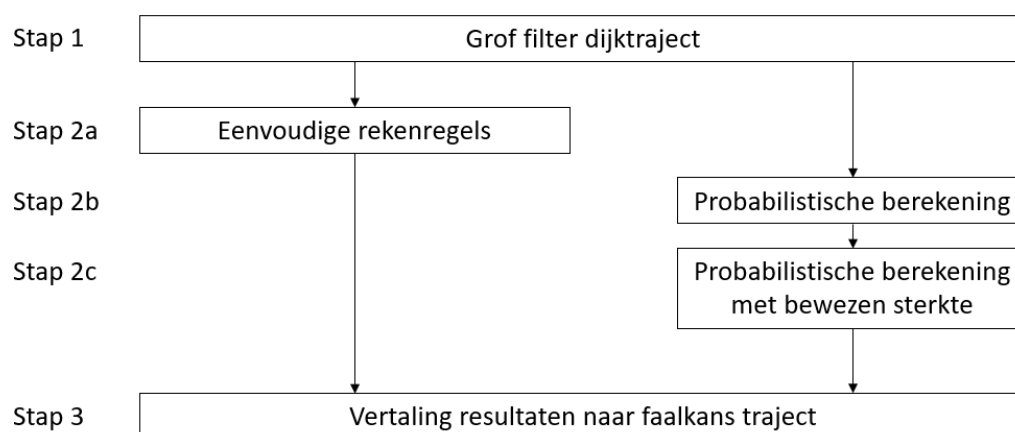
Voor de pilot is gekozen voor een probabilistische beoordeling met bewezen sterkte. Door het Wetterskip Fryslân is in 2016 een semi-probabilistische beoordeling van STBI uitgevoerd, waarvan de stabiliteitssommen beschikbaar zijn voor deze pilot [ref. 17]. Een probabilistische beoordeling is erg intensief met betrekking tot rekentijden en het volledig probabilistisch doorrekenen van alle sneden is voor deze pilot niet doelmatig. Er is daarom eerst een filtering toegepast om een aantal maatgevende rekensneden te bepalen. Deze rekensneden worden daarna probabilistisch doorgerekend.

6.4.1 Werkwijze filtering

Ter bepaling van de faalkans voor stabiliteit binnenwaarts is de volgende werkwijze gehanteerd (weergegeven in afbeelding 6.9):

- 1 controle op voldoende kleine faalkansen:
 - hierbij is gebruik gemaakt van screeningsmethodes op basis van eenvoudige regels en semi-probabilistische analyses. Vakken met een voldoende kleine faalkans zullen geen (grote) bijdrage leveren aan de overstromingskans;
- 2 ranking op basis van semi-probabilistische analyses:
 - in deze stap worden de doorsnedes gerangschikt op basis van te verwachten faalkansen (klein naar groot);
- 3 probabilistische analyses met bewezen sterkte voor strekkingen die vermoedelijk (op basis van ranking) een dominante bijdrage leveren aan de overstromingskans.

Afbeelding 6.9 Werkwijze bepaling faalkans STBI traject 103



6.4.2 Stap 1. Grof filter dijktraject

In stap 1 is grof gefilterd op basis van de hoofdkenmerken van het watersysteem. Er zijn 3 typen waterkeringen te onderscheiden rondom het pilotgebied (zie afbeelding 6.10):

- 1 hoge-grond-kering, circa 21 km;
- 2 recent versterkte keringen waarbij een binnentalud van 1:7 is aangebracht, circa 6,5 km;
- 3 overige polderdijken, circa 20,5 km.

Afbeelding 6.10 Hoofdkenmerken pilotgebied



Resultaat semi-probabilistische stabiliteitsanalyses

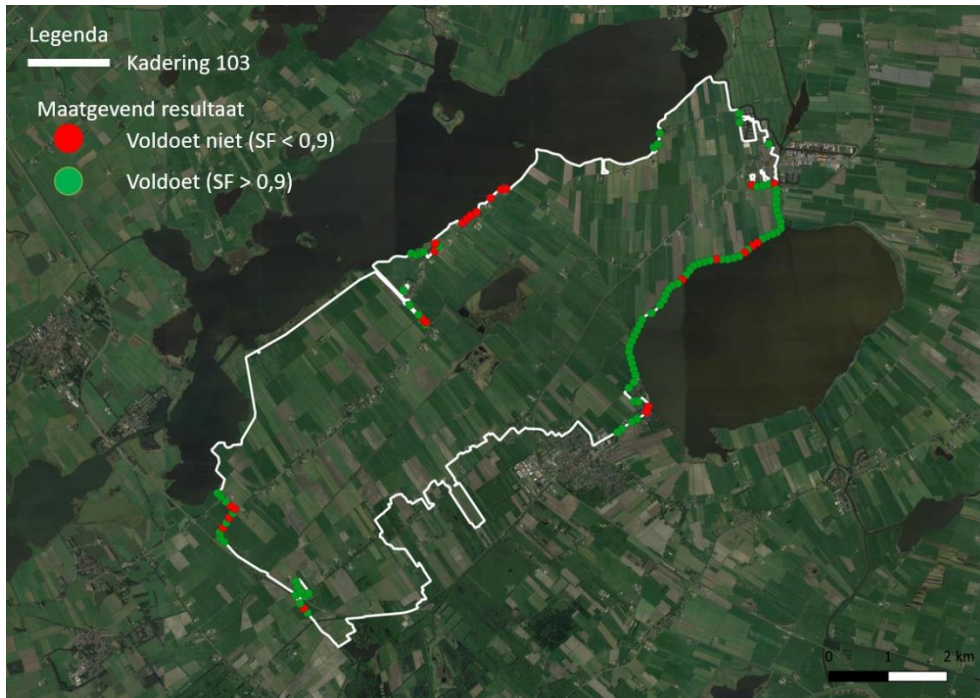
Voor pilotgebied zijn een groot aantal semi-probabilistische stabiliteitsberekeningen beschikbaar [ref. 17]. De berekeningen zijn geautomatiseerd doorgekend en per rekenlocatie zijn in sommige gevallen tientallen berekeningen beschikbaar. Er is gevarieerd in ondergrondscenario's, droge- en natte omstandigheden en verschillende rekenparameters. Voor de pilot is enkel de natte situatie (hoogwater) beschouwd¹. De resultaten van de semi-probabilistische rekenresultaten op locaties waar recent een versterking is uitgevoerd zijn niet beschouwd. De huidige situatie komt niet meer overeen met de rekenresultaten. Daarnaast kan worden aangenomen dat recent versterkte locaties geen grote faalkansbijdrage meer hebben.

In onderstaande afbeeldingen zijn per locatie weergegeven:

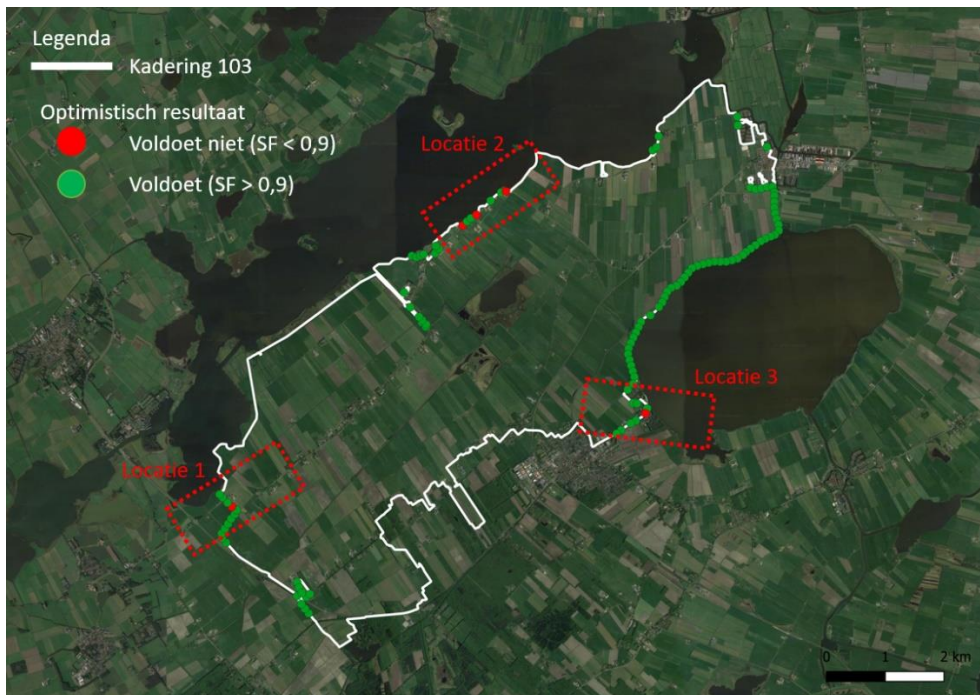
- afbeelding 6.11:
 - alle locaties waarbij de meest negatieve uitkomst van alle stabiliteitsberekeningen (laagste stabiliteitsfactor) niet voldoet aan de eis (eis zoals in de toetsing is aangehouden, ref. 17)). Dit kan een berekening zijn met een ondergrondscenario met een zeer lage kans van voorkomen en hoeft dus niet representatief te zijn voor de locatie;
- afbeelding 6.12:
 - resultaat macrostabiliteit, meest negatieve uitkomst van alle berekeningen op 1 locatie.

¹ Droge omstandigheden zijn bij veendijken relevant en kunnen een significante bijdrage leveren aan de overstromingskans.

Afbeelding 6.11 Resultaat macrostabiliteit, meest negatieve uitkomst van alle berekeningen op 1 locatie



Afbeelding 6.12 Resultaat macrostabiliteit, meest positieve uitkomst van alle berekeningen op 1 locatie



- 3 Op basis van afbeelding 6.11 en afbeelding 6.12 is duidelijk dat:
- 1 er een en groot aantal locaties bestaat waarbij alle semi-probabilistische berekeningen leiden tot een voldoende resultaat. Aangenomen dat, in ieder geval in het meest negatieve scenario per locatie, er in een conservatieve schematisatie kan worden geconcludeerd dat voor deze locaties de stabiliteit voldoende veilig is/dit niet de meest zwakke locaties zijn;
 - 2 er 3 locaties zijn waarbij zelfs de meest positieve schematisatie niet voldoet. Deze 3, naar verwachting zwakke plekken, zijn verder beschouwd.

6.4.3 Stap 2a. Eenvoudige rekenregels

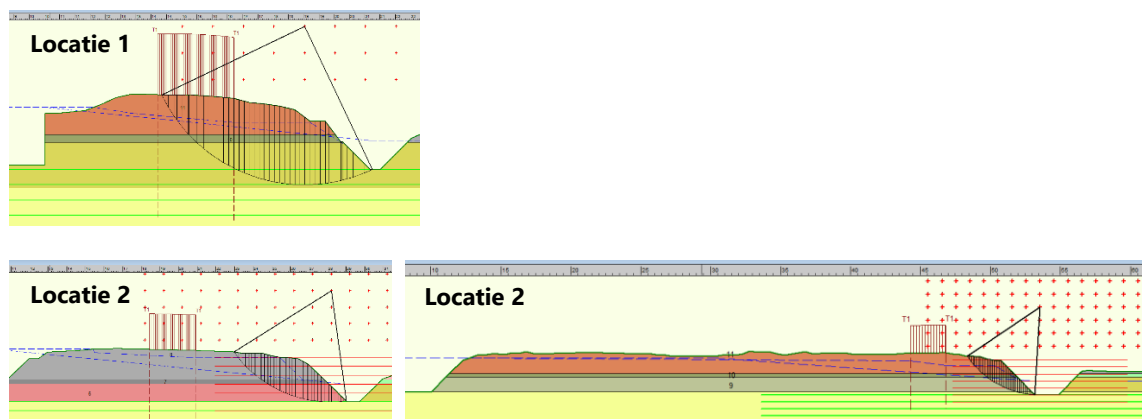
Na indeling in hoofdcategorieën kan op basis van eenvoudige rekenregels voor delen van de waterkering een beoordeling uitgevoerd worden. Voorbeelden van eenvoudige beschouwingen zijn:

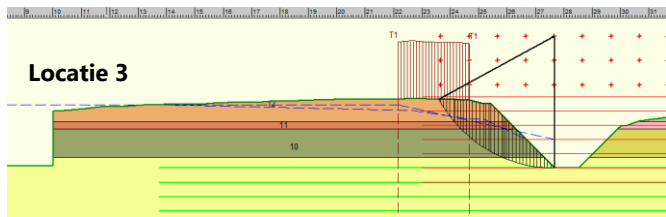
- 1 voor de delen waar de waterkering bestaat uit *hoge grond* kan de binnenwaartse stabiliteit goedgekeurd worden;
- 2 voor overige delen kan een beschouwing op basis van geometrische kenmerken uitgevoerd worden. Deze werkwijze is vergelijkbaar als de eenvoudige toets uit van STBI uit WBI [paragraaf 5.1 uit ref. 19]. Voor stabiliteit zijn onder andere kruinbreedte, taludhelling en de aanwezigheid van een (teen)sloot relevant. Een voorbeeld van een geometrische toets is in deze paragraaf (afbeelding 6.13) weergegeven;
- 3 een derde mogelijkheid is een beschouwing tussen de randvoorwaarden uit het ontwerp en de toetsing. Indien de kades recent zijn versterkt en degradatie niet, of beperkt, aan de orde is en de randvoorwaarden uit de toetsing gelijk of minder streng zijn dan waar in het ontwerp rekening mee is gehouden kan op een eenvoudige manier tot een oordeel gekomen worden.

Specifiek voor de pilot zijn de bovengenoemde methodes kansrijk:

- de delen waar de waterkering bestaat uit hoge grond (21 van de 48 km) kan eenvoudig goedgekeurd worden op basis van criterium (1) uit bovenstaande opsomming;
- de delen die recent versterkt (6,5 van de 48 km) zijn kunnen naar verwachting goedgekeurd worden op basis van criterium (2) en (3) uit de bovenstaande opsomming;
- voor de 3 geïdentificeerde zwakke plekken uit de vorige paragraaf is een eenvoudige beschouwing (2) uit bovenstaande opsomming uitgevoerd:
 - voor de 3 mogelijke zwakke plekken in de kadering is 1 stap dieper geanalyseerd hoe kritiek de doorsneden zijn. De maatgevende glijcirkel per berekening is weergegeven in afbeelding 6.13. Op basis van de verhouding tussen het maatgevende glijvlak en de breedte van de kering lijkt locatie 1 het meest kritiek. Deze visuele beschouwing is gebruikt als filtermethode naar de meest kritieke snede. Voor snede 2 en snede 3 is het de vraag of deze afschuiving op te vatten is als een kans op overstroming van het dijktraject.

Afbeelding 6.13 Maatgevende glijcirkel per stabiliteitssom, locatie 1 boven (SF = 0,67), locatie 2 midden (SF = 0,73 en 0,6 respectievelijk) en locatie 3 onder (SF = 0,41)





6.4.4 Stap 2b. Probabilistische berekening

Rekensneden

Op basis van de filtermethodes is de naar verwachting zwakste locatie doorgerekend:

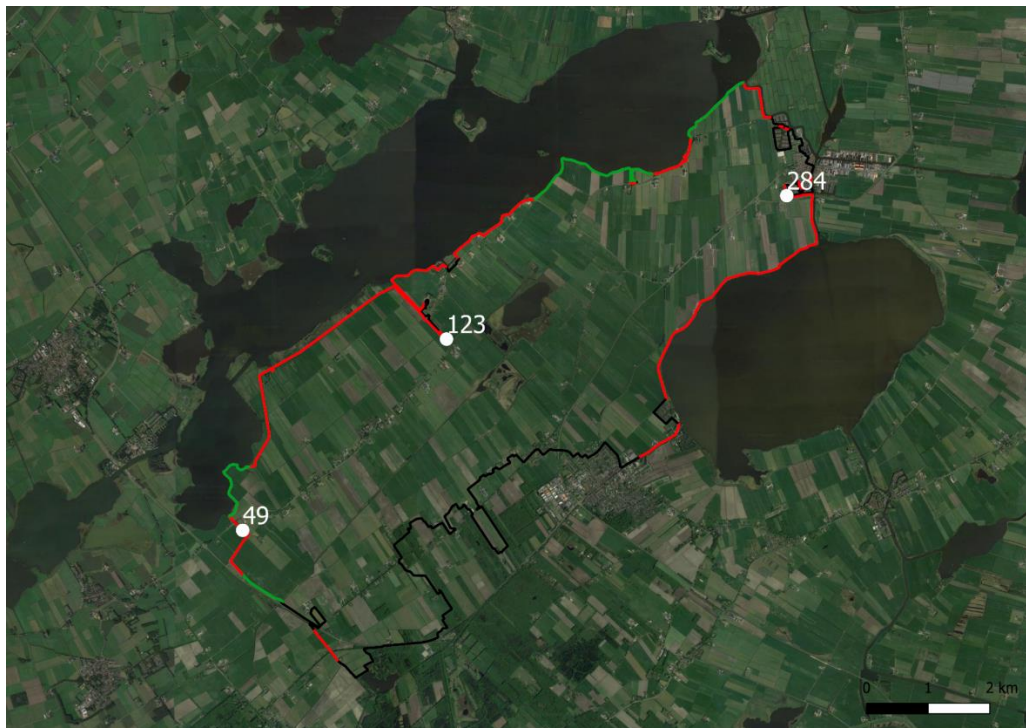
- 1 snede KR103_0049: dit is de meest maatgevende snede volgend uit de filtering uit stap 1, met een stabiliteitsfactor van 0,67.

Voor de pilotstudie zijn nog 2 andere rekenlocaties geselecteerd (niet op basis van filtering uit voorgaande paragrafen):

- 1 snede KR103_0123: deze snede heeft een veiligheidsfactor van 0,91 en voldoet daarmee juist aan de eis van 0,9;
- 2 snede KR103_0284: deze snede heeft ook een relatief lage stabiliteitsfactor van 0,74.

De locaties van de 3 rekensneden zijn weergegeven in Afbeelding 6.14.

Afbeelding 6.14 Locatie rekensneden macrostabiliteit



Per rekenlocatie zijn meerdere ondergrondscenario's beschikbaar. Voor de probabilistische analyse is enkel het ondergrondscenario doorgerekend met de grootste kans van voorkomen. De karakteristieken van de rekensneden zijn weergegeven in Tabel 6.7.

Tabel 6.7 Karakteristieken rekensneden

Rekensnede	X-RD	Y-RD	Ondergrond-segment (SOS)	Scenariokans ondergrond	Stabiliteitsfactor semi-probabilistisch
KR103_0049	162103	544829	305_1D3	0,63	0,67
KR103_0123	165399	547923	263_1D1	0,48	0,91
KR103_0284	170903	550253	277_1D2	0,95	0,74

Rekenmethode

Er zijn verschillende toepasbare probabilistische methodes, onder andere [ref. 15] (niet-uitputtend):

- 1 Monte Carlo-simulatie:
 - een exacte methode, maar in veel gevallen een rekenkundig intensieve methode;
- 2 numerieke integratie een exacte methode, maar rekenkundig intensief bij meerdere variabelen;
- 3 het berekenen van de conditionele faalkans voor een beperkt aantal belastingniveaus met interpolatie tussen deze belastingniveaus (fragility curve). Vervolgens wordt de fragility curve gecombineerd met de kansverdeling van de belasting. Dit is een benaderende methode. Een belangrijk voordeel is dat minder evaluaties van de grenstoestandsfunctie nodig zijn. Er dient bij deze methode wel voorzichtig omgegaan worden met niet-lineaire effecten (zoals opbarsten en verzadiging van de dijk ten gevolge van opbarsten).

In deze pilot is gekozen voor optie 3: fragility curves. In een beoordeling op basis van fragility curves wordt de conditionele faalkans afgeleid voor een beperkt aantal (discrete) belastingsscenario's. Deze punten vormen de fragility curve. Door deze conditionele faalkansen te integreren over de belastingstatistiek wordt de faalkans berekend. Omdat de fragility curve wordt opgesteld met een beperkt aantal discrete punten, dient bij deze methodiek wel voorzichtig omgegaan te worden met niet-lineaire effecten (zoals opbarsten en verzadiging van de dijk ten gevolge van overslag). De waterstandsstatistiek is afgeleid op basis van de promotor sommen (zie beoordeling hoogte, paragraaf 6.3). Door de waterstanden bij verschillende terugkeertijden is een Gumbelverdeling gefit. De waterstandstatistiek is afgeleid voor locatie KR0049. De verschillen tussen de 3 locaties zijn beperkt, dus de invloed hiervan is beperkt. Voor een uitgebreide beschrijving van deze werkwijze wordt verwezen naar bijlage I.

Opstellen fragility curve: conditionele faalkansen (STBI) gegeven waterstand

De faalkans van de waterkering op het faalmechanisme STBI gegeven een bepaalde waterstand is bepaald met behulp van D-Stability. De volgende werkwijze is gehanteerd voor de bepaling van de conditionele faalkansen (de fragility curve):

- in D-Stability is de maatgevende glijcirkel berekend op basis van de laagste stabiliteitsfactor (semi-probabilistisch);
- voor de maatgevende glijcirkel is in D-Stability de conditionele faalkans berekend (conditioneel, want het is de faalkans, gegeven het optreden van de buitenwaterstand). Deze conditionele faalkans is een benadering, omdat de maatgevende glijcirkel is bepaald met een semi-probabilistische analyse;
- de buitenwaterstand is gevarieerd met een stapgrootte van 20 cm:
 - per waterstand is de stijghoogte en freatische lijn gelijk verhoogd met de buitenwaterstand, dit betekent dat een 20 cm lagere buitenwaterstand leidt tot een freatisch vlak dat 20 cm lager ligt. Het polderpeil is constant gehouden;
- de gemiddelde waarde van de sterkteparameters is zo gekozen dat deze met de variatiecoëfficiënt uit Tabel 6.8 overeenkomt met de karakteristieke (5 %-waarde) uit de oorspronkelijke berekening;
- de modelfactor is gehanteerd conform tabel 5.1 [ref. 13] (normaalverdeling met gemiddelde 1,025 en standaard deviatie van 0,05);
- voor elke stap is gecontroleerd of er opbarsten plaatsvindt;
- de verkeersbelasting in de semi-probabilistische analyse is ook meegenomen in de bewezen sterkte-analyse. Dit is een optimistisch uitgangspunt, omdat aangenomen wordt dat deze belasting overleefd is (zie voor een uitgebreide toelichting paragraaf 8.2.4 uit [ref. 15]);

- de beschikbare semi-probabilistische stabiliteitsberekeningen zijn als uitgangspunt gehanteerd (geometrie, bodemopbouw, verloop waterspanningen en grondparameters), de berekeningen zijn voor deze pilot niet verfijnd.

Tabel 6.8 Verdeling stochasten sterkteparameters

Parameter	Verdelingstype	Variatiecoëfficiënt [-] in %	Bron
hoek van inwendige wrijving	lognormaal	10	tabel 2b, eurocode [ref. 14]
cohesie	lognormaal	20	tabel 2b, eurocode [ref. 14]
dilatantiehoek	lognormaal	10	gelijk aan hoek van inwendige wrijving

Resultaten probabilistische analyse per rekensnede

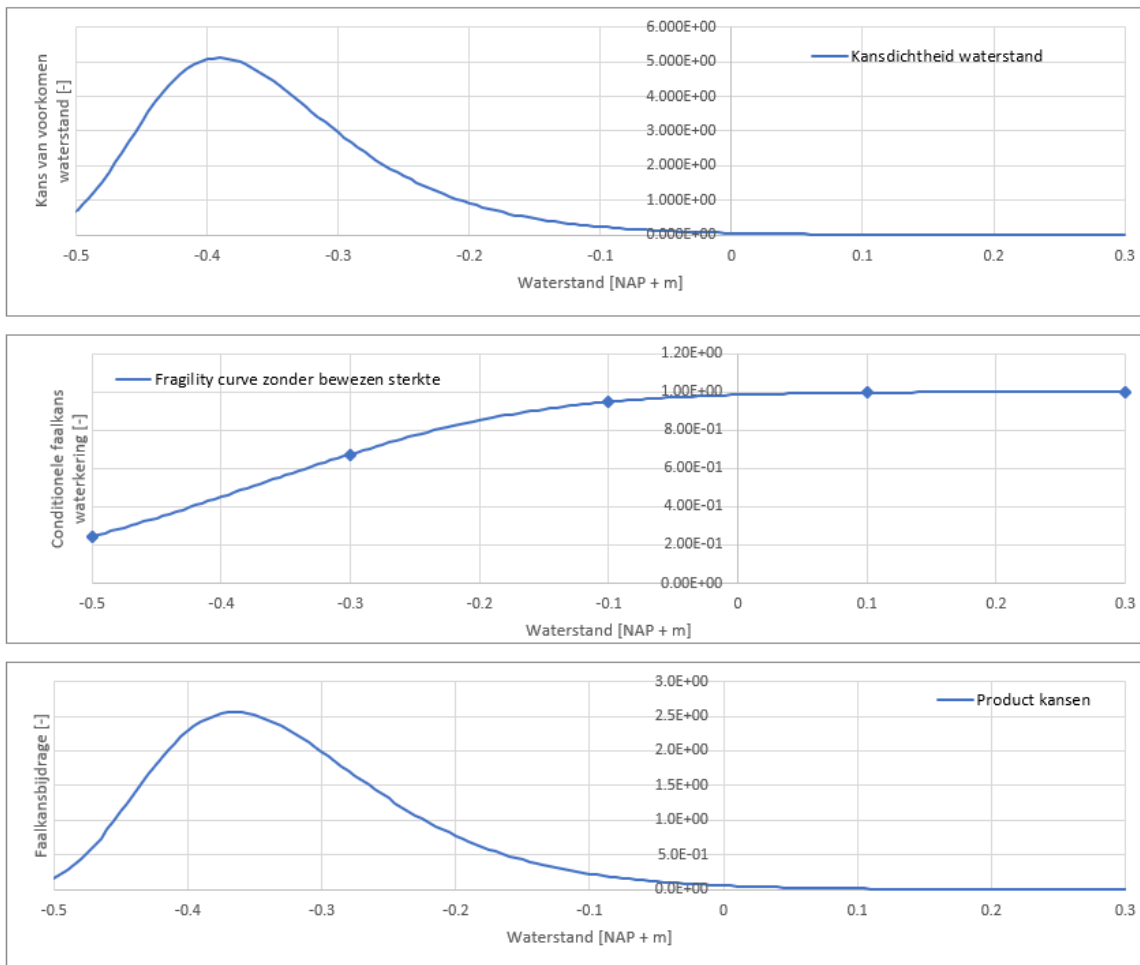
Het resultaat van de probabilistische analyse is weergegeven in Tabel 6.9 voor de 3 rekensneden en visueel voor snede KR103_0049 in Afbeelding 6.15, met daarin weergegeven:

- boven:
 - de kansdichtheid van de belasting. Dit is een Gumbelverdeling die is gefit door de terugkeertijden van de waterstand;
- midden:
 - de fragility curve met de conditionele faalkansen. De waterstanden waarvoor de conditionele faalkans is afgeleid in D-Stability zijn weergegeven met bolletjes. Tussen deze kansen is lineair geïnterpoleerd tussen de betrouwbaarheidsindexen;
- onder:
 - de kansdichtheid van de belasting vermenigvuldigd met de fragility curve. De oppervlakte onder deze grafiek is de faalkans.

Tabel 6.9 Resultaten rekensneden

Rekensnede	Stabiliteitsfactor semi-probabilistisch	Stabiliteitsfactor gemiddelde sterkteparameters bij dagelijks peil	Faalkans probabilistisch [per jaar]	Terugkeertijd probabilistisch [jaar]
KR103_0049	0,67	1,11	5,5E-01	2
KR103_0123	0,91	1,29	3,7E-02	27
KR103_0284	0,74	1,33	1,1E-01	9

Afbeelding 6.15 Faalkansanalyse snede KR103_0049. Boven: waterstandsverdeling. Midden: fragility curve. Onder: product kans op waterstand en faalkans STBI gegeven een bepaalde waterstand (product bovenste twee grafieken)



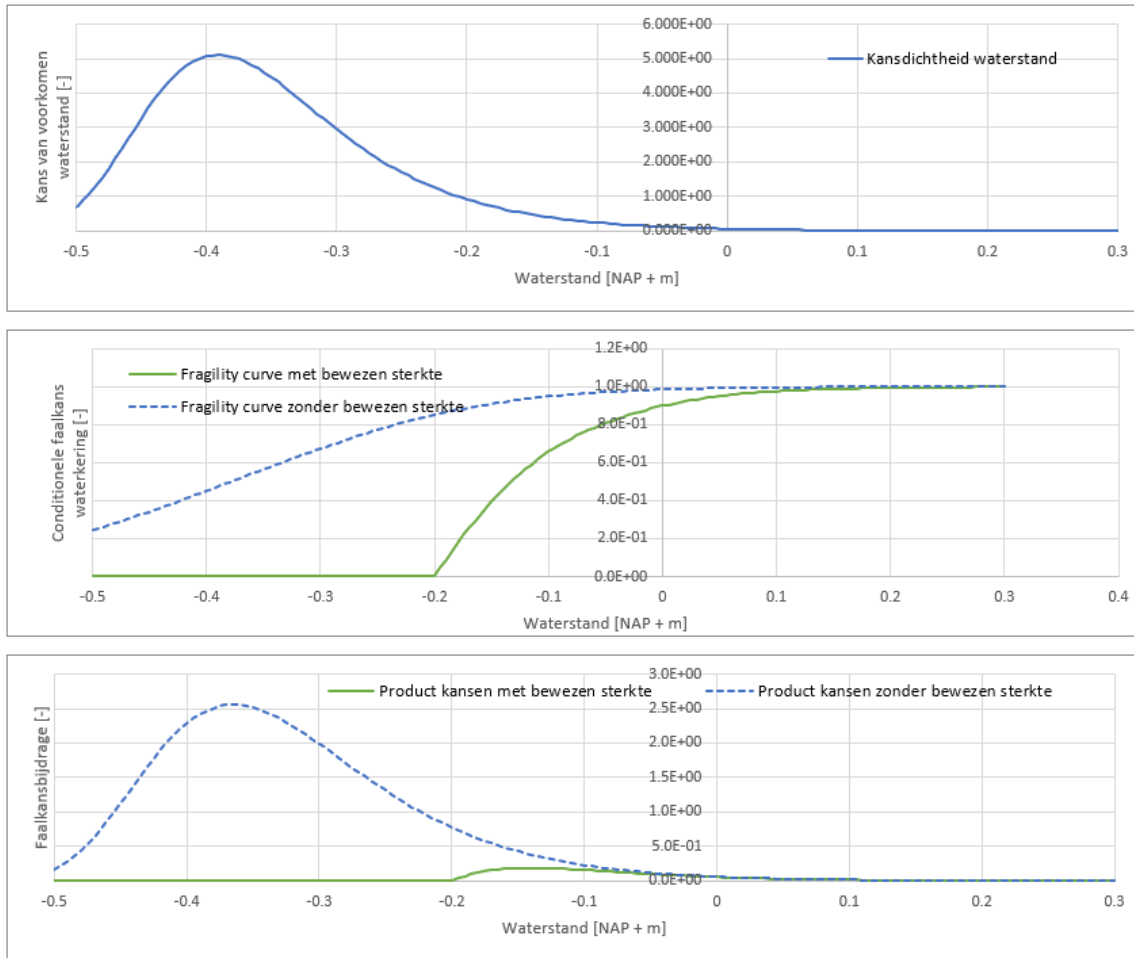
6.4.5 Stap 2c. Faalkansupdating op basis van bewezen sterkte

In paragraaf 6.4.4 is de faalkans van 3 sneden probabilistisch bepaald. Als vervolgstap is het effect van de toepassing van bewezen sterkte onderzocht. Bewezen sterkte is een vorm van faalkans updating, waarbij overleefde belastingcondities worden beschouwd om de faalkans bij te stellen. Wanneer een waterkering een bepaalde belasting heeft overleefd in het verleden, dan kan worden gesteld dat de sterkte van de waterkering hoger is (gegeven geen degradatie en zetting). Deze informatie kan worden gebruikt om de verdeling van de sterkte te updaten en zodoende tot een realistischere faalkans te komen.

De methode hoe bewezen sterkte wordt toegepast is beschreven in bijlage I. De methode is weergegeven voor een overleefde waterstand van NAP -0,2 m in afbeelding 6.16:

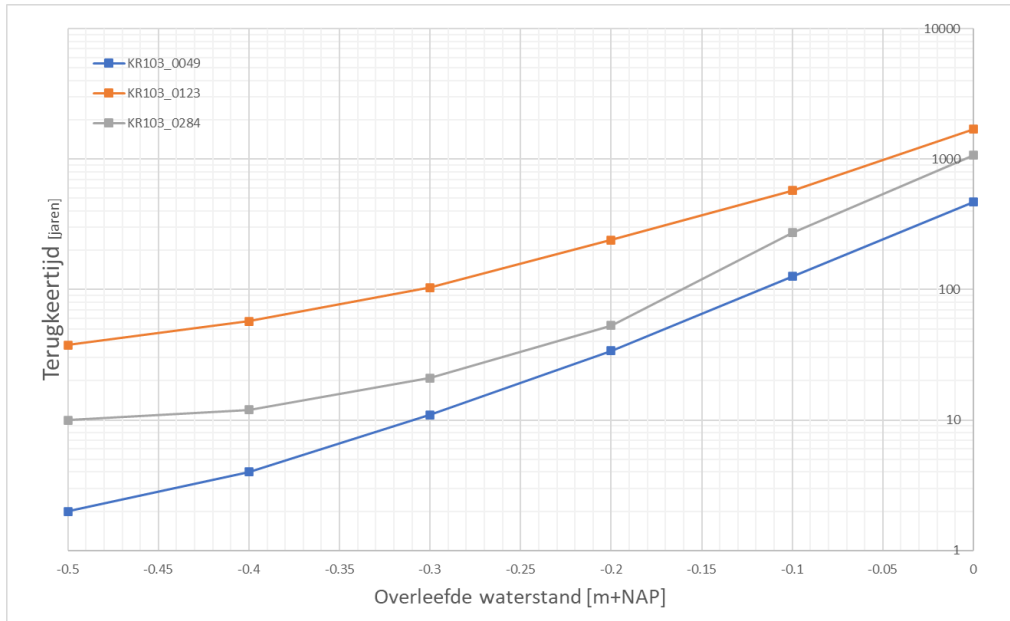
- bij waterstanden lager dan NAP -0,2 m is de conditionele faalkans 0. De sterkte van de waterkering is hoger dan deze overleefde waterstand;
- bij waterstanden hoger dan NAP -0,2 m daalt de conditionele faalkans ook, omdat bepaalde ongunstige combinaties van parameters uitgesloten zijn vanwege de overleefde waterstand.

Afbeelding 6.16 Bewezen sterkte voor doorsnede KR103_0049 met een 'overleefde waterstand' van NAP -0,2 m



Het effect van de toepassing van bewezen sterkte op de faalkans is weergegeven in Afbeelding 6.17 voor de 3 rekensneden, voor een variërende overleefde waterstand op de X-as. Bij hogere overleefde waterstanden daalt de faalkans per rekensnede significant.

Afbeelding 6.17 Effect bewezen sterkte op faalkans



Op basis van globale data van de boezempeilen is een waterstand van circa NAP -0,2 m voorgekomen in 1998 (zie paragraaf 2.6). Als gesteld wordt dat deze waterstand is opgetreden en aantoonbaar 'overleefd' is, dan levert dit een factor 6 tot 17 lagere faalkansen op, zoals weergegeven in tabel 6.10. De aanname van de overleefde waterstand is mogelijk voor de proof of concept in deze studie, het is onvoldoende basis voor een daadwerkelijke studie omdat niet bekend is of deze waterstand ook ter plaatse van de kadering aanwezig was en hoe lang deze waterstand heeft aangehouden en of er een bovenbelasting aanwezig was.

Tabel 6.10 Faalkans zonder en met bewezen sterkte (overleefde waterstand = NAP -0,2 m)

Rekensnede	Faalkans zonder bewezen sterkte [per jaar]	Faalkans met bewezen sterkte [per jaar]	Factor verschil
KR103_0049	1/2	1/34	17
KR103_0123	1/27	1/240	9
KR103_0284	1/9	1/53	6

6.4.6 Stap 3. Vertaling faalkans per snede naar faalkans dijktraject

In stap 2 zijn voor verschillende rekensneden faalkansen bepaald. Deze doorsnedekansen zijn in stap 3 vertaald naar een faalkans voor het gehele dijktraject voor het faalmechanisme stabiliteit binnenwaarts door:

- 1 de doorsnedefaalkansen te vertalen naar een faalkans voor een dijkvak;
- 2 de faalkansen per dijkvak te vertalen naar een faalkans voor het pilotgebied.

Sneden naar dijkvak

De (toename) in faalkans van een doorsnede naar een dijkvak is afhankelijk van de lengte van het dijkvak en de (on)afhankelijkheid in belasting en sterkte binnen het dijkvak:

- voor de belasting (waterstand) is volledige afhankelijkheid aangenomen: de waterstand zal binnen een dijkvak vrijwel identiek zijn;
- voor de sterkte kan niet zomaar aangenomen worden dat alle sneden binnen een vak afhankelijk zijn. Bij een langer dijkvak neemt (bijvoorbeeld) de kans toe dat er een (onverwachte) slappe laag aanwezig is. Als bovengrens is uitgegaan van een onafhankelijke doorsnede voor elke 50 m waterkering. Deze

50 meter is een representatieve lengte voor het mechanisme macrostabiliteit [ref. 25]. Volledige afhankelijkheid binnen een dijkvak is de ondergrens (zie paragraaf 6.2).

Fragility curve per dijkvak

In de fragility curve zijn sterkte en belasting separaat beschouwd. Door een fragility curve op te stellen van het dijkvak kan de afhankelijkheid in sterkte worden verwerkt in de conditionele faalkansen. Door de fragility curve van het dijkvak te integreren over dezelfde waterstandstatistiek wordt de belasting dan volledig afhankelijk meegenomen.

Als ondergrens van de conditionele faalkans geldt volledige afhankelijkheid en sterkte. De conditionele faalkans voor een dijkvak is gelijk aan de maximale conditionele faalkans van de sneden binnen een dijkvak:

$$P_{vak,i}(STBI|h) = \max(P_{snede}(STBI|h))$$

Indien wordt aangenomen dat het dijkvak uniform is en dat alle sneden daarom dezelfde faalkans hebben betekent dit:

$$P_{vak,i}(STBI|h) = P_{snede}(STBI|h)$$

Waarin:

- $P_{vak,i}(STBI|h)$ de conditionele faalkans van het dijkvak gegeven een waterstand [-];
- $P_{snede}(STBI|h)$ de conditionele faalkans van een snede gegeven een waterstand [-].

Als bovengrens van de conditionele faalkans is uitgegaan van onafhankelijkheid en sterkte¹. De voorwaardelijke faalkans voor een dijkvak is gelijk aan:

$$P_{vak,i}(STBI|h) = 1 - (1 - P_{snede}(STBI|h))^n$$

Waarin:

- $P_{vak,i}(STBI|h)$ de conditionele faalkans van het dijkvak is gegeven een waterstand [-];
- $P_{snede}(STBI|h)$ de conditionele faalkans van een doorsnede is gegeven een waterstand [-];
- n aantal sneden in een vak.

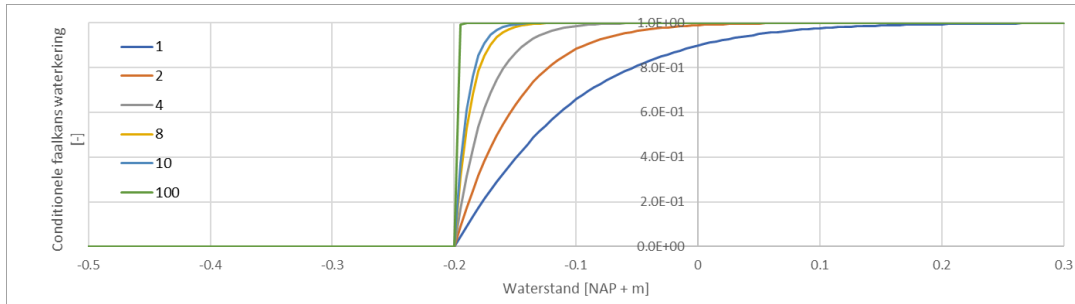
Integratie fragility curve dijkvak over belastingstatistiek

Om de faalkans per dijkvak te bepalen wordt de fragility curve opgesteld per dijkvak, waarna deze geïntegreerd wordt over de waterstandsstatistiek. Op deze manier blijft de waterstand een afhankelijke stochast (gelijk binnen een dijkvak). Voor de 2 doorsnedes met de uiterste doorsnedekansen (49 en 123) is de aanpassing van de fragility curve als functie van het aantal (onafhankelijke) doorsnedes weergegeven in afbeelding 6.18 en Afbeelding 6.19.

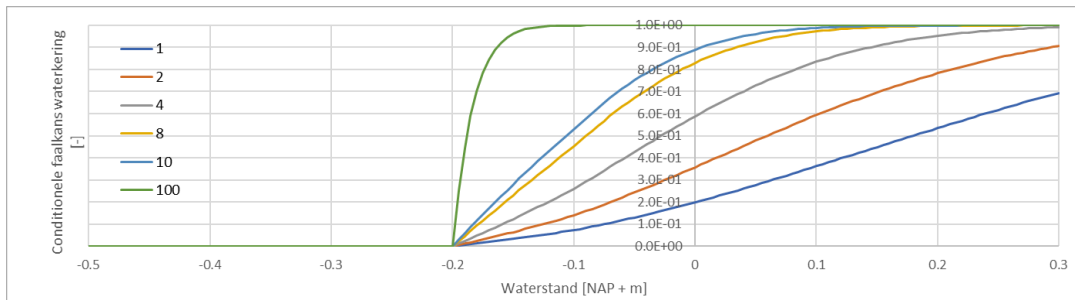
De donkerblauwe lijn (1) is de oorspronkelijke fragility curve en geldt als ondergrens (aanname afhankelijkheid). De overige lijnen beschrijven de fragility curve bij onafhankelijke doorsnedes als functie van het aantal doorsnedes (100 m bij twee doorsnedes tot 5000 m bij 100 sneden). In de grafieken is te zien dat bij een stijgend aantal onafhankelijke sneden een sprong ontstaat in de conditionele faalkans ter plaatse van de overleefde waterstand. In feite is een deterministische fragility curve ontstaan, waarbij de sterkte gelijk is aan de overleefde waterstand. De faalkans voor STBI is dan gelijk aan de overschrijdingskans van de overleefde waterstand.

¹ Als elementaire bovengrens van de faalkans gelden wederzijds exclusieve kansen (disjoint): als falen optreedt op locatie A dan zeker niet op een andere locatie. In deze benadering worden de vakkansen opgeteld, dit is (bij kleine faalkansen) vrijwel gelijk aan de onafhankelijke benadering.

Afbeelding 6.18 Faalkans dijkvak als functie van aantal onafhankelijke identieke sneden profiel 49



Afbeelding 6.19 Faalkans dijkvak als functie van aantal onafhankelijke identieke sneden profiel 123



Van dijkvakken naar kadering

Voor het bepalen van de faalkans van het dijktraject gelden dezelfde aannamen met betrekking tot afhankelijkheden. Er is een fragility curve (sterkte conditioneel op de belasting) opgesteld voor het traject die is gecombineerd met de belastingstatistiek. Op deze manier is de afhankelijkheid in de belasting geborgd. De ondergrens van de faalkans is bepaald onder een aanname van afhankelijkheid tussen de vakken, waardoor de faalkans van de kadering gelijk is aan de hoogste faalkans van de vakken (de ketting is zo zwak als de zwakste schakel):

$$P_{traject}(STBI|h) = \max(p_{vak,i})$$

Als bovengrens van de faalkans is bepaald onder een aanname van onafhankelijkheid tussen de vakken, waardoor de faalkans van de kadering gelijk is aan:

$$P_{traject}(STBI|h) = 1 - (1 - P_{vak,i})^n$$

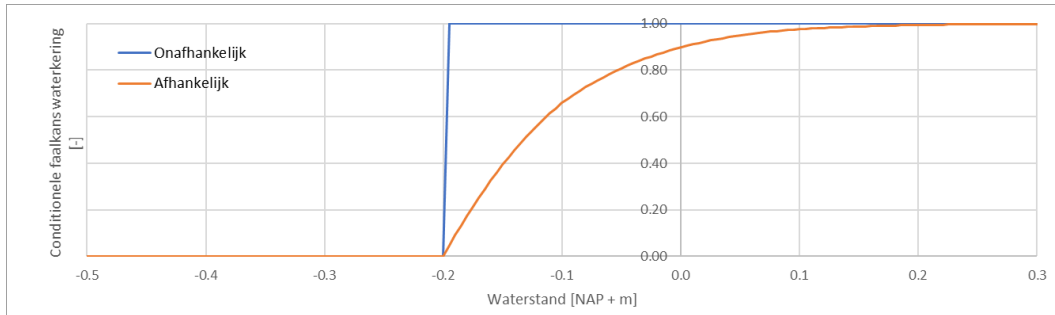
Waarin:

- $P_{traject}(STBI|h)$ faalkans dijktraject gegeven buitenwaterstand [-];
- $P_{vak,i}$ faalkans dijkvak i [-].

Het resultaat van deze grenzen is weergegeven in Afbeelding 6.20:

- de fragility curve bij **afhankelijke dijkvakken** vormt de ondergrens. De conditionele faalkans van het traject is gelijk aan de maximale faalkans op doorsnedeniveau. Er is afhankelijkheid binnen- en tussen de dijkvakken. De faalkans bedraagt dan 1/34 per jaar na integratie over de belastingstatistiek;
- de fragility curve bij onafhankelijke dijkvakken (400 vakken; elke 50 m een onafhankelijke doorsnede bij 20 km waterkering) vertoont een sprong rond de overleefde waterstand, met een conditionele faalkans van 0 beneden deze waterstand en een conditionele faalkans van 1 boven deze waterstand. De faalkans is gelijk aan de overschrijdingsfrequentie van de overleefde waterstand en **bedraagt 1/15 per jaar** na integratie over de belastingstatistiek.

Afbeelding 6.20 Fragility curve kadering voor STBI (boven- en ondergrens faalkans)



6.4.7 Aantal onafhankelijke doorsneden

Voor de kadering zijn de aannames met betrekking tot de (on)afhankelijkheid niet heel bepalend. De faalkans van snede 49 is dusdanig hoog dat de range aan berekende faalkansen voor de onder- en bovengrens beperkt is (1/34 tot 1/15 per jaar). In de berekening van de faalkans in paragraaf 6.4.4 is echter uitgegaan van 400 onafhankelijke sneden bij de berekening onder aanname van onafhankelijkheid (eigenlijk ook bij afhankelijkheid, maar daar heeft dit geen invloed, omdat de maatgevende doorsnede toch dominant is). Uitgaan van 400 vakken met identieke (zwakke) sneden is conservatief en onrealistisch. Als tweede benadering is op basis van de locaties van de onderliggende semi-probabilistische sommen (zie Afbeelding 6.21 uitgegaan van:

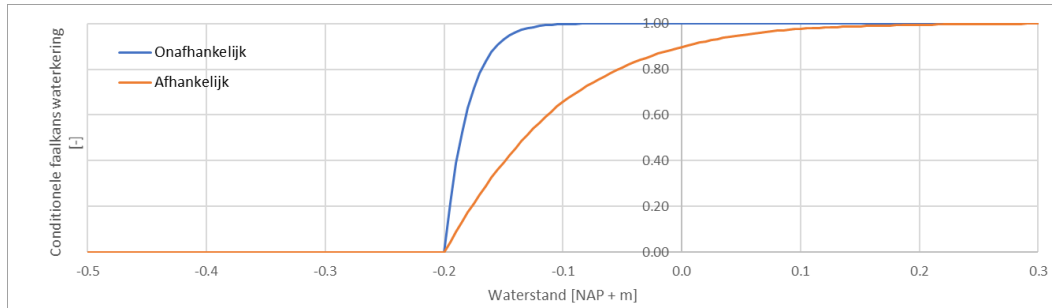
- doorsnede 49:
 - representatief voor 200 m waterkering, met 4 onafhankelijke sneden van 50 m;
- doorsnede 123:
 - representatief voor 200 m waterkering, met vier onafhankelijke sneden van 50 m;
- doorsnede 284:
 - representatief voor 100 m waterkering, met twee onafhankelijke sneden van 50 m.

Ondanks het beperkte aantal doorsneden benadert de fragility curve snel een deterministische sprong bij onafhankelijkheden, zoals weergegeven in afbeelding 6.22. De totale faalkans voor het dijkttraject is bij deze benadering 1/19 per jaar. Een beperkte mate van onafhankelijkheid resulteert bij hoge conditionele faalkansen al snel in een fragility curve die de bovengrens benadert (1/15 per jaar).

Afbeelding 6.21 Locatie doorsnede 49 (links), 123 (midden) en 284 (rechts)



Afbeelding 6.22 Faalkans dijktraject stabiliteit (bij 4 doorsnedes 49, 4 doorsnedes 123 en twee doorsnedes 284)



6.4.8 Gevoeligheidsanalyse bepaling trajectkansen

Beschrijving gevoeligheidsanalyse

In de vorige paragraaf is op basis van de fragility curve voor doorsneden een fragility curve en faalkans voor het traject afgeleid. De conditionele faalkansen voor doorsneden zijn echter al dusdanig hoog dat de boven- en ondergrensbenadering van de fragility curve van het traject dermate dicht bij elkaar liggen dat verdere detaillering niet zinvol is.

Er is daarom een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarin gekeken is naar minder zwakke vakken.

Voor de probabilistische berekeningen zijn de bestaande semi-probabilistische berekeningen als uitgangspunt gehanteerd. Deze conservatieve analyses zijn niet aangescherpt. Aanscherping is mogelijk, (niet uitputtend):

- de kans op, en schematisering van de verkeerslast (zie ook paragraaf 6.4.9);
- rekening houden met de kans op ondergrondscenario's (in de huidige aanpak is alleen het ondergrondscenario met de hoogste kans van voorkomen meegenomen);
- aanscherpen ondergrondparameters met lokale spreiding;
- bepalen respons van de stijghoogte op buitenwaterstand;
- bepalen ligging freatische lijn.

De verwachting is dat doorsnedekansen naar beneden bijgesteld kunnen worden. Als vereenvoudiging van de analyses voor deze pilot zijn de macrostabiliteitsanalyses niet daadwerkelijk aangescherpt maar is aangenomen dat de doorsnedefaalkansen met een factor 100 naar beneden bijgesteld kunnen worden. Dit is gedaan door de conditionele faalkans per waterstand door 100 te delen.

Een factor 100 lagere faalkansen kan naast rekenkundige aanscherping ook door de zwakste plekken in de kadering te versterken.

Trajectkans bij aanname sterkere doorsneden

Voor het bepalen van de fragility curve voor het gehele traject is dezelfde aanpak gehanteerd als in voorgaande paragrafen (een boven- en ondergrens op basis van aannamen van afhankelijkheid).

De fragility curve van het traject is bepaald voor 3 scenario's:

- 1 400 vakken van 50 m met snede 49, maar met een conditionele faalkans die een factor 100 lager is;
- 2 4 vakken met snede 49, 4 vakken met snede 123 en twee vakken met snede 284 (zie paragraaf 6.4.7);
- 3 399 vakken van 50 m met snede 49 met een conditionele faalkans die een factor 100 lager is en 1 vak met de originele conditionele faalkansen van snede 49 (1 dominant vak).

De resulterende faalkansen voor het gehele traject zijn weergegeven in tabel 6.11. De fragility curves bij de boven- en ondergrensbenadering zijn weergegeven in afbeelding 6.23, afbeelding 6.24 en afbeelding 6.25:

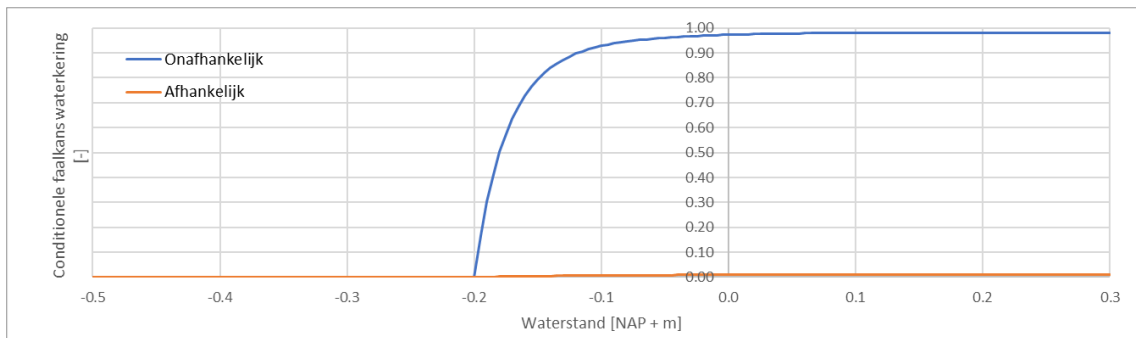
- indien de vakken een vergelijkbare conditionele faalkans hebben, heeft de keuze met betrekking tot afhankelijkheid een grote invloed op de faalkans op trajectniveau;

- indien 1 vak dominant is, heeft de keuze met betrekking tot afhankelijkheid een verwaarloosbare invloed op de faalkans op trajectniveau.

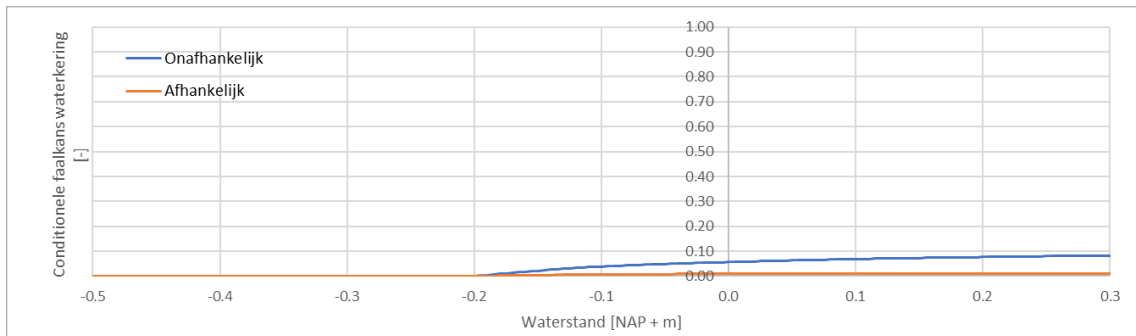
Tabel 6.11 Faalkansen voor de 3 scenario's

Scenario	1	2	3
afhankelijk	1/21	1/578	1/19
onafhankelijk	1/3.406	1/3.406	1/34

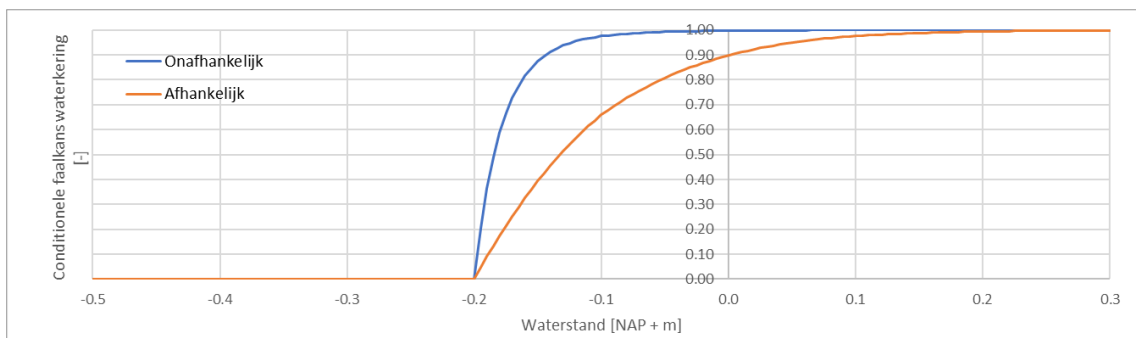
Afbeelding 6.23 Scenario 1: trajectfaalkans bij 400 dijkvakken vak 49



Afbeelding 6.24 Scenario 2: trajectfaalkans bij 4 vakken 49, 4 vakken 123 en twee vakken 284



Afbeelding 6.25 Scenario 3: trajectfaalkans bij 399 vakken 49 bij een faalkans gedeeld door 100 en 1 vak met de originele faalkans van vak 49



6.4.9 Gevoeligheidsanalyse verkeersbelasting

Naast de freatische lijn in de dijk is een verkeersbelasting een belangrijke aandrijvende kracht voor de stabiliteit van de waterkering. In deze gevoeligheidsanalyse is onderzocht hoe dominant de belasting is. In de probabilistische analyse is de buitenwaterstand (en de daarmee samenhangende freatische lijn in de dijk) als dominante belastingparameter gehanteerd. Deze parameters zijn uitgezet in discrete scenario's. In deze gevoeligheidsanalyse is de invloed van de verkeersbelasting beschouwd. Van de rekensneden die zijn beschouwd ligt alleen voor rekensnede 49 de verkeersbelasting in de maatgevende glijcirkel (weergegeven in afbeelding 6.26). De invloed van de verkeerslast ter plaatse van deze rekensnede is onderzocht.

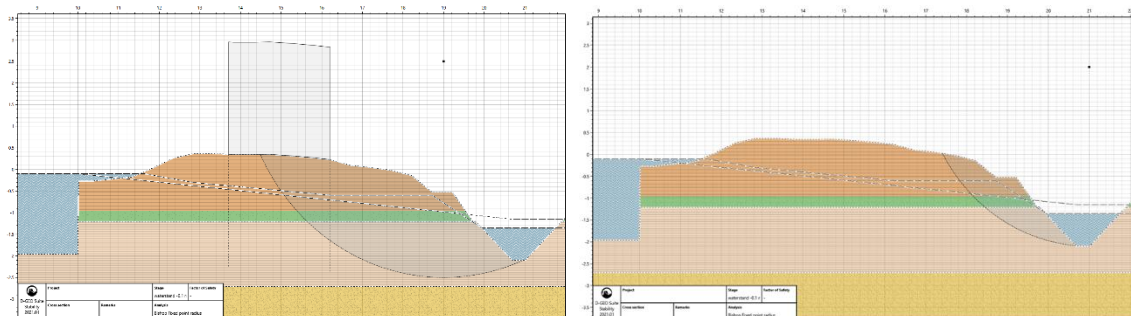
In de (semi-)probabilistische analyse is rekening gehouden met een verkeerslast van 13 kN/m^2 over een breedte van 2,5 m met 100 % aanpassing van de waterspanning voor zand en 0 % aanpassing voor de cohesieve lagen. Een verkeerslast van 13 kN/m^2 komt overeen met de belasting van een rij zandauto's op de kruin van de dijk [ref. 28]. Rekensnede 49 bevindt zich aan een doodlopende landweg aan het einde 1 boerderij. Het is niet ondenkbaar dat met regelmaat zwaar landbouwverkeer over de weg rijdt. Daarnaast is het goed voor te stellen dat tijdens hoogwater een geladen vrachtwagen (bijvoorbeeld met zandzakken) gebruik maakt van de weg op de kruin. Voor aanscherping van de overstromingskans is het mogelijk om aan te scherpen op:

- de kans dat de verkeerslast gedurende hoogwater aanwezig is;
- de grootte van de verkeerslast;
- aanpassingspercentages.

In deze gevoeligheidsanalyse is onderzocht wat de stabiliteit is als de verkeerslast in zijn geheel niet wordt meegenomen in de analyse. Voor de situatie zonder verkeerslast is allereerst in de semi-probabilistische analyse de nieuwe maatgevende glijcirkel bepaald. De glijcirkels zijn weergegeven in afbeelding 6.26 en de resulterende faalkansen in tabel 6.12.

Op basis van een visuele beoordeling van de glijcirkels is de diepe glijcirkel een relevante glijcirkel voor de bepaling van de overstromingskans. Voor de ondiepe glijcirkel is het de vraag of bij het optreden van deze afschuiving een overstroming optreedt. Voor beide glijcirkels is de faalkans berekend.

Afbeelding 6.26 Maatgevende glijcirkels rekensnede 49 met (links) en zonder verkeersbelasting (rechts)



Tabel 6.12 Faalkansen snede 49 met en zonder verkeerslast

Faalkans [1/jaar]	Met verkeerslast	Zonder verkeerslast	
	Diepe glijcirkel	Oppervlakkige glijcirkel	Diepe glijcirkel
zonder bewezen sterkte	1/2	1/10	1/1.361
met bewezen sterkte	1/34	1/82	1/1.979

Uit deze gevoeligheidsanalyse volgt dat de verkeerslast een belangrijke parameter is voor de stabiliteit van de waterkering. In de bewezen sterkte analyse zal met dit gegeven rekening moeten worden gehouden (voor de proof of concept in deze pilot is dat niet gedaan). In veel gevallen zal niet gesteld kunnen worden dat een bepaalde verkeerslast is overleefd in combinatie met een hoge freatische lijn in de dijk. Het is de vraag of een eenvoudige methode zoals uitgevoerd in deze pilot dan toepasbaar is.

6.5 Conclusies

6.5.1 Hoogte

Op basis van de uitgevoerde analyses wordt geconcludeerd dat:

- bestaande probabilistische PROMOTOR berekeningen kunnen worden gebruikt om de maatgevende doorsneden binnen een dijkvak te identificeren;
- door een grove dijkvak indeling te maken kan op eenvoudige manier een inschatting worden gemaakt van de trajectfaalkans;
- onderlinge (on)afhankelijkheden tussen dijkvakken kunnen op meerdere manieren worden aangenomen. De meest realistische benadering zal afhankelijk zijn van de lokale situatie (oriëntatie kering, afhankelijkheid in belasting, et cetera);
- het effect van een hoger toelaatbaar overslagdebiet op de faalkans is vooral zichtbaar bij dijkvakken met een grote strijklengte, zoals meren. Voor kleine vaarten en kanalen is dit effect minimaal;
- het verhogen van het kritieke overslagdebiet heeft als gevolg dat de faalkans daalt, omdat meer water in het achterland wordt toegestaan. Er is dan een analyse van de schade in het achterland door het overslagdebiet nodig. In deze analyse zijn de ruimtelijke verschillen in het achterland dan belangrijk. Binnen deze pilot is rekening gehouden met schade aan bebouwing zodra er een waterstand van 20 cm tegenaan staat. Dit heeft als gevolg dat de waterstand in de lagergelegen weilanden een stuk dieper is dan 20 cm. Vanuit het oogpunt van bijvoorbeeld vee op het weiland is echter een andere overstromingsdefinitie mogelijk. De keuze voor de overstromingsdefinitie is een beleidstechnische keuze.

6.5.2 Macrostabieliteit

Op basis van de uitgevoerde analyses wordt geconcludeerd dat:

- met behulp van grove filters een groot deel van het dijktraject eenvoudig beoordeeld kan worden;
- bestaande (semi-probabilistische) berekeningen kunnen worden gebruikt om de doorsneden te rangschikken en zo te filteren naar de doorsneden die naar verwachting het veiligheidsoordeel zullen domineren;
- probabilistische analyses met bewezen sterkte relatief eenvoudig zijn toe te passen om een veiligheidsoordeel op doorsnede-, vak- en trajectniveau te bepalen. Hierbij moet wel rekening te worden met enkele aandachtspunten:
 - de freatische lijn in de dijk is de drijvende hydraulische belasting voor macrostabieliteit. Een overleefde waterstand bij een korte tijdsduur betekent niet dat de waterkering zeker veilig is gedurende dezelfde waterstand bij langere tijdsduur;
 - verkeersbelasting kan een significante drijvende belasting zijn voor de stabiliteit van een grondlichaam. Als dit het geval is maakt het de bewezen-sterkte analyse op basis van overleefde waterstanden complexer;

- als de verkeerslast dominant is, dan is een ander type faalkansberekening nodig om bewezen sterkte toe te passen. Het gaat dan immers niet om de waterstand maar om de verkeerslast;
- voor een beeld van de betrouwbaarheid zou dan de verkeerslast als variabele grootte kunnen worden behandeld, en de waterstand constant kunnen veronderstellen (andersom ten opzichte van wat in de pilot is gedaan). Het is dan ook niet langer zuiver -los van bewezen sterkte- om te veronderstellen dat er continu en overal een hoge verkeerslast aanwezig is. Dit deel zou dan dus ook netter geschematiseerd moeten worden;
- met eenvoudige rekenregels is de bandbreedte in trajectfaalkans te bepalen (onder aannamen voor onafhankelijke of afhankelijke faalkansen voor doorsneden en vakken:
 - als de doorsnedekansen hoog zijn (orde 1/10 tot 1/100) geeft de bandbreedte in trajectkansen al voldoende nauwkeurigheid;
 - als de doorsnedekansen hoog zijn (orde 1/10 tot 1/100) zal de trajectkans met bewezen sterkte bij onafhankelijke vakken snel convergeren naar de terugkeertijd van de overleefde waterstand;
 - als de doorsnedekansen lager zijn (orde 1/10.000 of lager) dan is de bandbreedte in trajectkansen (afhankelijk of onafhankelijke vakken) groot en is het zinvol om de mate van afhankelijkheid te bepalen.

6.6 Reflectie op analyses

Op basis van de uitgevoerde analyses wordt geconcludeerd dat:

- de voorliggende pilot dient te worden gezien als een 'proof of concept' voor de toepassing van bewezen sterkte in het kader van de overstromingskansbepaling van regionale keringen. Binnen deze analyse zijn verschillende vereenvoudigingen toegepast. Daarnaast zijn al beschikbare berekeningen als gegeven beschouwd en niet verfijnd. Deze aanpak volstaat als 'proof of concept'. De rapportage is geen volledige beschrijving van bewezen sterkte methodiek en de daarbij behorende aandachtspunten. Er zijn diverse uitvoerende rapporten beschikbaar die een vollediger beeld geven, zoals [ref. 15, 16 en 18]. Voor de toepassing bij toekomstige ontwerpen en beoordelingen wordt naar deze rapporten verwezen;
- voor boezemkaden zijn naast de buitenwaterstand andere belastingen of belastingeffecten relevant: zoals verkeersbelasting (voor een uitgebreide toelichting zie paragraaf 6.5.2);
- het uitvoeren van een probabilistische analyse voor macrostabiliteit is met de komst van het softwarepakket D-Stability enorm versimpeld ten opzichte van de voorloper D-Geo Stability;
- in de pilotstudie is van de bestaande semi-probabilistische analyse direct de stap gemaakt naar een probabilistische analyse met bewezen sterkte. Een verfijning van de basisschematisering of grondige controle van de uitgangspunten is als tussenstap nodig in een formele toetsing of ontwerp. Als toetsmethodiek kan bijvoorbeeld gekozen worden voor:
 - een zeer conservatieve basisschematisering om vast te stellen welke profielen zeker veilig zijn (als zeer conservatieve uitgangspunten voldoen dan is het profiel veilig);
 - een zeer gunstige basisschematisering om vast te stellen welke profielen zeker niet voldoen (als zeer gunstige uitgangspunten al niet voldoen dan voldoet het profiel zeker niet);
- in de pilotstudie is gebruik gemaakt van rankingsmethodes om vast te stellen welke profielen of vakken zeker veiliger zijn dan andere. Deze methode werkt goed als het doel is om de overstromingskans vast te stellen en er een aantal dominante vakken aanwezig zijn. Bij het bepalen welke delen van de waterkering **wel of niet** voldoen is deze aanpak niet doelmatig.

Dergelijke vereenvoudigde berekeningen zijn niet geschikt om te gebruiken als uitgangspunt in een probabilistische analyse en zeker niet in een probabilistische analyse met bewezen sterkte.

7

KOSTEN-BATENANALYSE

In dit hoofdstuk is een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) opgenomen. In deze MKBA is gekeken naar verschillende normen (overstromingskansen) van de waterkeringen van het pilotgebied en is een optimale overstromingskans afgeleid.

In een kosten-batenanalyse worden de kosten van een project afgetrokken van de baten (of opbrengsten). Hierdoor kunnen vergelijkingen worden gemaakt tussen verschillende alternatieven. Ten behoeve van deze analyse zijn de kosten (directe kosten en onderhoudskosten, paragraaf 7.1) en de baten (risicoreductie, paragraaf 7.2) berekend bij verschillende normen. De onderhoudskosten en risicoreductie spelen over een langere periode en zijn daarom teruggerekend naar een netto contante waarde.

Aan de hand van de berekend kosten en baten zijn verschillende mogelijke normen beschouwd.

7.1 Kosten dijkversterking

De kosten van een dijkversterking zijn afhankelijk van het profiel van de waterkering. Het profiel van de waterkering is afhankelijk van de vereiste betrouwbaarheid. Bij een hogere norm hoort een hogere vereiste betrouwbaarheid, een sterker profiel en zodoende hogere kosten. In de onderstaande sub-paragrafen zijn aannames met betrekking tot de kosten per profiel onderbouwd.

7.1.1 Profielen per norm

Bij de huidige norm van 1/100 per jaar is de kerende hoogte circa 2 m en is het vereiste binnentalud aangenomen op 1:4. Bij een strengere norm is aangenomen dat het dijkprofiel op 2 aspecten wijzigt (en vice versa voor een minder strenge norm):

- een hogere vereiste kerende hoogte;
- een hogere vereiste stabiliteit van het binnentalud.

Hogere kerende hoogte

Bij een strengere norm dient te worden uitgegaan van een langere terugkeertijd van de buitenwaterstand. De decimeringshoogte voor de kadering is afgeleid op basis van de PROMOTOR-sommen die zijn beschreven in paragraaf 6.3. Voor verschillende punten is het HBN bij verschillende normen beschouwd. De decimeringshoogte bedraagt circa 0,15 m.

Dit betekent dat een 10 keer strengere norm (bijvoorbeeld van 1/10 per jaar naar 1/100 per jaar) tot een 0,15 m hoger kruin leidt. Er is aangenomen dat een 3x strengere norm (bijvoorbeeld van 1/10 per jaar naar 1/30 per jaar) tot een 0,05 m hogere kruin leidt.

Hogere stabiliteit

Bij een strengere norm dient te worden uitgegaan van een hogere vereiste stabiliteitsfactor. Er is aangenomen dat bij een strengere norm het binnentalud verflauwd dient te worden:

- bij 1/10 per jaar dient het binnentalud 1:3 te zijn;
- bij 1/30 per jaar dient het binnentalud 1:3,5 te zijn;
- bij 1/100 per jaar dient het binnentalud 1:4 te zijn, et cetera.

De resulterende dijkprofielen zijn weergegeven in Tabel 7.1. Hierin zijn ook de breedte van de dijk berekend (teen tot teen) en de oppervlakte van de doorsnede ten behoeve van de kosten.

Tabel 7.1 Dijkprofiel per norm

Norm [per jaar]	1/10	1/30	1/100 (huidig)	1/300	1/1.000	1/3.000	1/10.000
aangenomen:							
buitentalud	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3
kruinbreedte [m]	2	2	2	2	2	2	2
kruinhoogte [m +mv]	1,85	1,90	2,00	2,05	2,15	2,20	2,30
binnentalud	1:3	1:3,5	1:4	1:4,5	1:5	1:5,5	1:6
berekend:							
breedte dijk [m]	13,1	14,4	16,0	17,4	19,2	20,7	22,7
oppervlakte doorsnede [m ²]	14,0	15,6	18,0	20,0	22,8	25,0	28,5

7.1.2 Kosten dijkversterking

De totale kosten van een dijkversterking bestaan uit initiële aanlegkosten en periodieke onderhoudskosten:

- de initiële aanlegkosten zijn berekend op basis van de dimensies van de dijk (variërend met de norm);
- de periodieke onderhoudskosten zijn aangenomen niet afhankelijk te zijn van de dimensies van de dijk (constant met de norm).

Aanlegkosten

De kosten van de profielen uit tabel 7.1 zijn berekend op basis van de volgende uitgangspunten:

- de kosten van een dijkversterking bestaan uit vaste kosten en variabele kosten;
- de vaste kosten zijn grotendeels onafhankelijk van de norm / dimensies van de waterkering;
- de variabele kosten worden hoofdzakelijk gedreven door grondstof (kosten van dijkmateriaal) en vastgoed (kosten voor ruimtegebruik dijk). Er is uitgegaan van 1 materiaal (kleidijk) en 1 grondprijs (landelijk gebied in Friesland). Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende aangenomen eenheidsprijzen:
 - leveren en verwerken dijkklei¹: EUR 20,-- per m³;
 - aankoop grond landelijk gebied Friesland²: EUR 40,-- per m².

De kosten van groot onderhoud van Wetterskip Fryslân bedragen EUR 275,-- per strekkende meter (zie onderhoudskosten³). Dit bedrag is aangehouden als de prijs per strekkende meter van het minimale profiel dat wordt beschouwd (norm van 1/10 per jaar). Er is reeds een grondlichaam aanwezig ter plaatse van alle dijken, dus er is aangenomen dat het op orde brengen van het minimale benodigde profiel bij benadering hetzelfde kost als groot onderhoud.

Voor de strengere normen is de hoeveelheid extra benodigde klei en grondaankoop per strekkende meter berekend ten opzichte van dit minimale profiel en is deze meerprijs opgeteld bij de kosten per strekkende meter.

¹ Op basis van kostenboeken van verschillende dijkversterkingen.

² Op basis van een gemiddelde kavelprijs in Friesland van EUR 200/m² [ref. 30] en middels expert judgement maal 20 % voor dijkgebied.

³ Op basis van e-mailcontact met Wetterskip Fryslân d.d. 18 november 2021.

Er zijn in eerste instantie geen knikpunten in kosten beschouwd. Het zou bijvoorbeeld kunnen zijn dat vanaf een bepaalde benodigde stabiliteitsfactor constructieve elementen nodig zijn die een significante sprong in de kosten opleveren.

Onderhoudskosten

De kosten van regulier beheer en onderhoud zijn aangenomen op EUR 10,- per strekkende meter per jaar [ref. 31]. Onder regulier beheer en onderhoud wordt verstaan: bestrijding plaagsoorten, handhaving, inspectie en maaionderhoud.

De netto contante waarde (NCW¹) van regulier onderhoud is berekend voor een oneindige periode (perpetuïteit), waarbij het onderhoud elk jaar plaatsvindt:

$$NCW = \frac{I}{d}$$

Waarin:

$NCW_{regulier\ onderhoud}$	netto Contante Waarde van de onderhoudskosten [EUR];
I	investeringskosten per jaar (=10) [EUR];
d	discontovoet (=0,0225 conform discontovoet Rijkswaterstaat 2021 [ref. 32]); [-].

De kosten van groot onderhoud van Wetterskip Fryslân (frequentie eens per 30 jaar) bedragen EUR 275 per strekkende meter. Onder groot onderhoud wordt verstaan: frezen, verhogen in verband met zettingen, zaaien en herstelwerkzaamheden aan hekwerk.

De netto contante waarde (NCW) van groot onderhoud is berekend voor een oneindige periode van onderhoud, waarbij het eerste onderhoud plaatsvindt na 30 jaar. De overige betalingen worden als oneindige reeks berekend vanaf deze eerste investering, met een discontovoet (referentieperiode van 30 jaar) van:

$$d_{T\ jaar} = (1 + d_{1\ jaar})^T - 1$$

$$NCW_{groot\ onderhoud} = \frac{I}{(1 + d_{1\ jaar})^T - 1}$$

Waarin:

$NCW_{groot\ onderhoud}$	netto Contante Waarde van de onderhoudskosten [EUR];
I	investeringskosten per terugkeertijd (=275) [EUR];
T	terugkeertijd van de investering (=30) [jaar];
$d_{1\ jaar}$	discontovoet (=0,0225 conform discontovoet Rijkswaterstaat 2021 [ref. 32]); [-].

Kosten dijkversterking per norm

In tabel 7.2 zijn de aanlegkosten, onderhoudskosten en totaalkosten berekend bij een variërende norm.

¹ De Netto Contante Waarde (NCW) is de waarde van een toekomstige investering teruggerekend naar het heden, rekening houdend met de tijdwaarde van geld. Een geldbedrag in het heden heeft meer waarde dan hetzelfde geldbedrag in de toekomst (nog zonder rekening te houden met inflatie) als gevolg van de opportunitykosten (ook wel: opportunity cost of capital). De opportunitykosten worden uitgedrukt in een discontovoet waarin het rendement wordt uitgedrukt dat kan worden verwacht als het geldbedrag ergens anders in zou worden geïnvesteerd.

Tabel 7.2 Kosten dijkversterking

Norm [per jaar]	1/10	1/30	1/100 (huidig)	1/300	1/1.000	1/3.000	1/10.000
breedte dijk [m]	13,1	14,4	16,0	17,4	19,2	20,7	22,7
oppervlakte doorsnede [m ²]	14,0	15,6	18,0	20,0	22,8	25,0	28,5
Grondaankoop (kosten berekend t.o.v. van norm 1/10)							
grondaankoop [m ² /m]	0	1,3	2,9	4,3	6,1	7,6	9,6
prijs grondaankoop [EUR/m ² /m]	40	40	40	40	40	40	40
kosten grondaankoop [EUR/m]	0	52	116	172	244	304	384
Dijkmateriaal (kosten berekend t.o.v. van norm 1/10)							
hoeveelheid klei [m ³ /m]	0	1,6	4,0	6,0	8,8	11	14,5
prijs klei [EUR/m ³]	20	20	20	20	20	20	20
kosten klei [EUR/m]	0	32	80	120	176	220	290
Aanlegkosten (kosten grond + kosten materiaal)							
aanlegkosten dijkprofiel [EUR/m] (initiële investering)	275	359	471	567	695	799	949
Kosten regulier beheer en onderhoud (jaarlijks)							
kosten onderhoud [EUR/m]	10	10	10	10	10	10	10
NCW kosten regulier beheer en onderhoud [EUR/m]	445	445	445	445	445	445	445
Kosten groot onderhoud (terugkeertijd 30 jaar, eerste kosten na 30 jaar)							
kosten onderhoud [EUR/m]	275	275	275	275	275	275	275
NCW kosten groot onderhoud [EUR/m]	290	290	290	290	290	290	290
Totaalkosten (aanlegkosten + NCW kosten regulier beheer en onderhoud + NCW kosten groot onderhoud)							
totale kosten per m [EUR/m]	1.010	1.094	1.206	1.302	1.430	1.534	1.684
lengte dijk [m]	26.000	26.000	26.000	26.000	26.000	26.000	26.000
totale kosten [EUR]	26.260.000	28.444.000	31.356.000	33.852.000	37.180.000	39.884.000	43.784.000

7.2 Baten dijkversterking

De baten van een dijkversterking bestaan uit een reductie van het overstromingsrisico. Het overstromingsrisico is berekend door de schade te vermenigvuldigen met de faalkans. Er is voor de schade uitgegaan van de maximale schade in het pilotgebied (EUR 45.000.000,-, zoals berekend onder deelvraag 1).

De netto contante waarde (NCW) van het risico is berekend voor oneindige periode van jaarlijks risico, waarbij het risico elk jaar aan het begin van het jaar is berekend:

$$NCW_{risico} = \frac{R}{d} = \frac{S * P_f}{d}$$

Waarin:

NCW_{risico}	netto Contante Waarde van het risico [EUR];
R	jaarlijks risico [EUR];
S	potentiële schade in polder bij falen dijk in jaar 1 (=45.000.000) [EUR];
P_f	faalkans dijk per jaar, gelijk aan de norm [-];
d	discontovoet (=0,0225 conform discontovoet Rijkswaterstaat 2021 [ref. 32]); [-]

In Tabel 7.3 zijn de baten van de dijkversterking (afname risico) berekend bij een toenemende norm.

Tabel 7.3 Baten dijkversterking (afname risico). Technisch gezien negatieve baten, want het beschrijft een risico (lagere waarde is beter)

Norm [per jaar]	1/10	1/30	1/100 (huidig)	1/300	1/1.000	1/3.000	1/10.000
faalkans dijk per jaar [-]	1/10	1/30	1/100	1/300	1/1.000	1/3.000	1/10.000
potentiële schade [EUR]	45.000.000	45.000.000	45.000.000	45.000.000	45.000.000	45.000.000	45.000.000
jaarlijks risico [EUR]	4.500.000	1.500.000	450.000	150.000	45.000	15.000	4.500
NCW Risico [EUR]	200.000.000	67.000.000	20.000.000	6.700.000	2.000.000	670.000	200.000

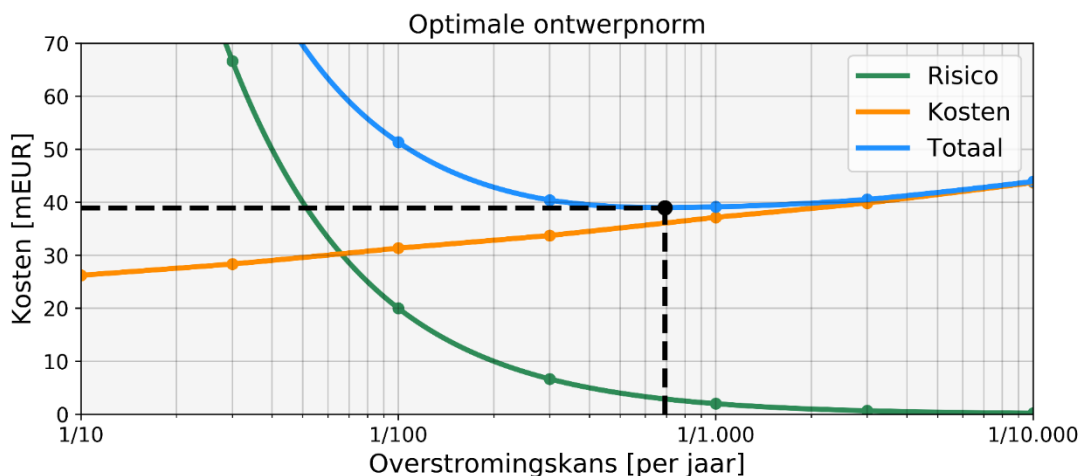
7.3 Optimale ontwerp- en toetsnorm

Op basis van de berekende kosten en baten zijn de optimale overstromingskansen voor ontwerp en toetsing afgeleid. Hierbij is de overstromingskans van de waterkering gelijk gesteld aan de norm.

7.3.1 Optimale ontwerpnorm

De optimale ontwerpnorm is bepaald door de overstromingskansen te berekenen met hoogste baten ten opzichte van kosten. Voor een waterkering bestaan de baten uit een reductie van het risico. De kosten (berekend in tabel 7.2) zijn opgeteld bij het risico (berekend in tabel 7.3) om tot de totaalkosten te komen. De kosten, het risico en de totaalkosten zijn uitgezet tegen de afnemende overstromingskansen in afbeelding 7.1. De optimale norm is gevonden bij een overstromingskans van 1/690 per jaar.

Afbeelding 7.1 De optimale overstromingskans voor het pilotgebied met betrekking tot ontwerp bedraagt 1/690 per jaar

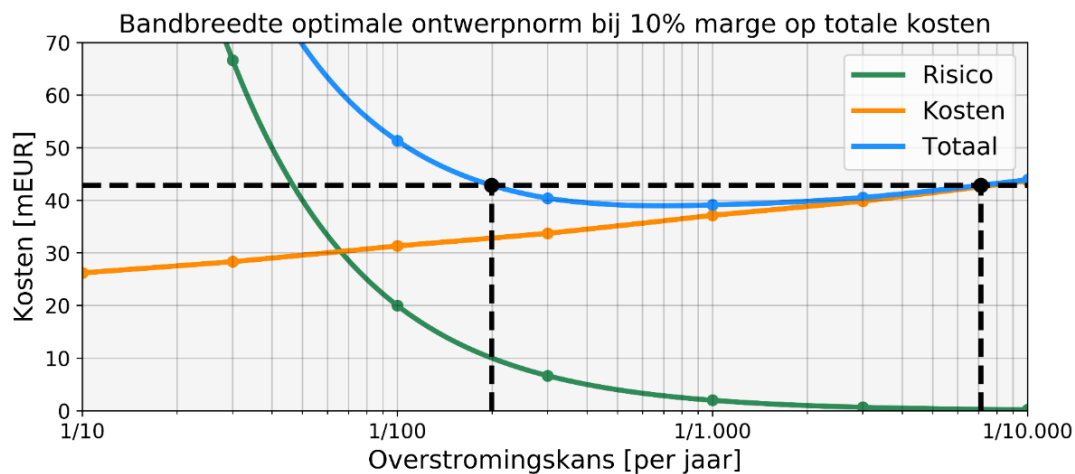


7.3.2 Gevoeligheid optimale ontwerpnorm

In afbeelding 7.1 is te zien dat de lijn van de totaalkosten rondom de optimale overstromingskans vrijwel horizontaal loopt. Dit betekent dat de optimale norm relatief gevoelig is voor onzekerheden in de totaalkosten.

In afbeelding 7.2 is een 10 % marge op de optimale totaalkosten berekend. Er is te zien dat de overstromingskansen tussen 1/200 en 1/7.100 per jaar binnen een 10 % marge vallen ten opzichte van de optimale ontwerpnorm.

Afbeelding 7.2 De bandbreedte bij 10 % marge op totaalkosten



Deze gevoeligheid betekent dat de pragmatische optimale norm mogelijk afwijkt van de theoretisch optimale norm. Een marge van 10% valt immers ruim binnen de praktische marges van de kosten van een versterkingsopgave als gevolg van (niet-uitputtend):

- kostenvariatie tijdens uitvoering als gevolg van bijvoorbeeld wijzigingen aan het ontwerp of fluctuerende materiaalprijzen. Ter illustratie; aan het eind van de planfase van een dijkversterking wordt meestal nog gewerkt met een marge op de kostenraming van 20 à 30 %;
- fluctuaties van het risico in de polder als gevolg van wijzigingen in het achterland zoals de aanleg van nieuwbouw, etc. gedurende de levensduur van de waterkering.

Een afwijking van het optimum als gevolg van dergelijke variaties zal dus niet tot een wezenlijk andere NCW leiden. Een pragmatische optimale norm betekent dan mogelijk dat er een robuustere waterkering wordt ontworpen. Een keuze voor een robuustere waterkering leidt bijvoorbeeld tot toekomstige ontwerprijheden (niet uitputtend):

- de volgende ophoging of versterking kan langer worden uitgesteld als de waterkering voldoet aan een strengere norm dan wettelijk vereist. Dit kan ertoe leiden dat de volgende versterking kan worden afgestemd op andere factoren, zoals externe meekoppelkansen of fluctuerende grondstofprijzen;
- de volgende ophoging of versterking kan gebruik maken van een 'sterkere fundering' (bijvoorbeeld damwanden die kunnen worden opgelengd in plaats van vervangen, omdat deze bij de vorige versterking extra sterk zijn uitgevoerd).

Robuust ontwerpen kan echter ook tot extra knelpunten in de inpassing van het ontwerp leiden. Indien een robuuster ontwerp leidt tot het moeten uitkopen van woningen, dan kan de noodzaak van een robuuster ontwerp juridisch lastig te onderbouwen te zijn (dit zou ook leiden een ander optimum als gevolg van een sprong in de kosten, zoals beschouwd in paragraaf 7.5). Optimale toetsnorm. De optimale toetsnorm vanuit economisch perspectief wordt gevonden door de maximale toelaatbare faalkans te berekenen. Zodra

de faalkans groter wordt dan deze toelaatbare faalkans, loont het om te versterken. Ten behoeve van de berekening van de optimale toetsnorm zijn de jaarlijkse investeringskosten en het jaarlijkse risico tegen elkaar uitgezet.

Jaarlijkse investeringskosten

De jaarlijkse investeringskosten zijn berekend door het jaarlijkse bedrag te berekenen dat bij oneindige jaarlijkse betalingen leidt tot een NCW gelijk aan de totale investeringskosten:

$$I = NCW_{investering} * d = 7.150.000 * 0,0225 = 161.000$$

Waarin:

I	jaarlijkse investeringskosten [EUR];
$NCW_{investering}$	netto Contante Waarde (gelijkgesteld aan de investeringskosten, aangenomen als de kosten voor groot onderhoud (EUR 275 per meter) langs 26 km dijk ofwel 7.150.000) [EUR];
d	discontovoet (=0,0225 conform standaarddiscontovoet Rijkswaterstaat 2021); [-].

Jaarlijkse risico

Het jaarlijkse risico is berekend door de maximale schade te vermenigvuldigen met de faalkans (berekend in Tabel 7.3).

De jaarlijkse investeringskosten en het jaarlijkse risico zijn uitgezet tegen de variërende overstromingskans in afbeelding 7.3. De optimale toetsnorm is te vinden in het snijpunt van de lijnen en ligt bij een overstromingskans van 1/280 per jaar.

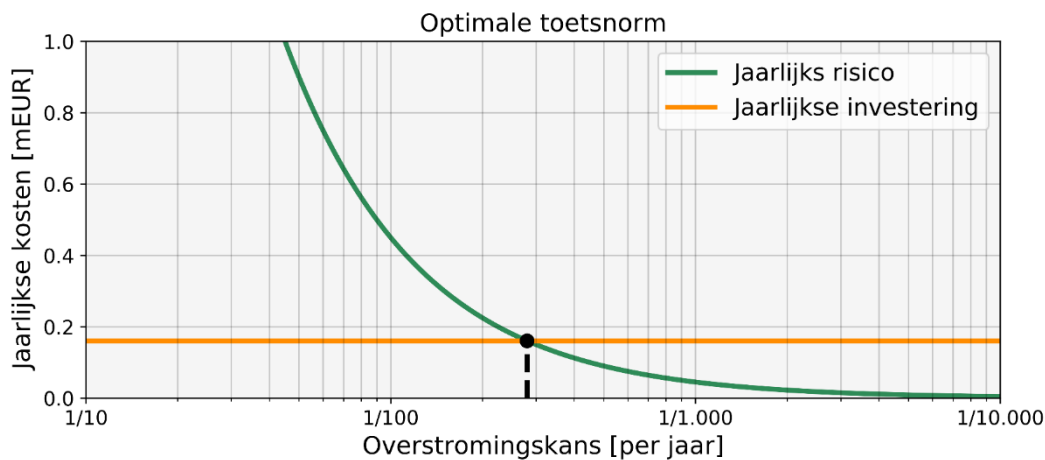
In deze methode is impliciet aangenomen dat de overstromingskans na versterken veel kleiner is dan op het moment van versterken. De optimale toetsnorm kan ook analytisch worden berekend met onderstaande formule, met dezelfde uitkomst:

$$P_0 = \frac{I}{S} * d = \frac{7.150.000}{45.000.000} * 0,0225 = \frac{1}{280}$$

Waarin:

P_0	de optimale toetsnorm [per jaar];
I	investeringskosten (=7.150.000) [EUR];
S	maximale schade (=45.000.000) [EUR];
d	discontovoet (=0,0225 conform discontovoet Rijkswaterstaat 2021 [ref. 32]); [-].

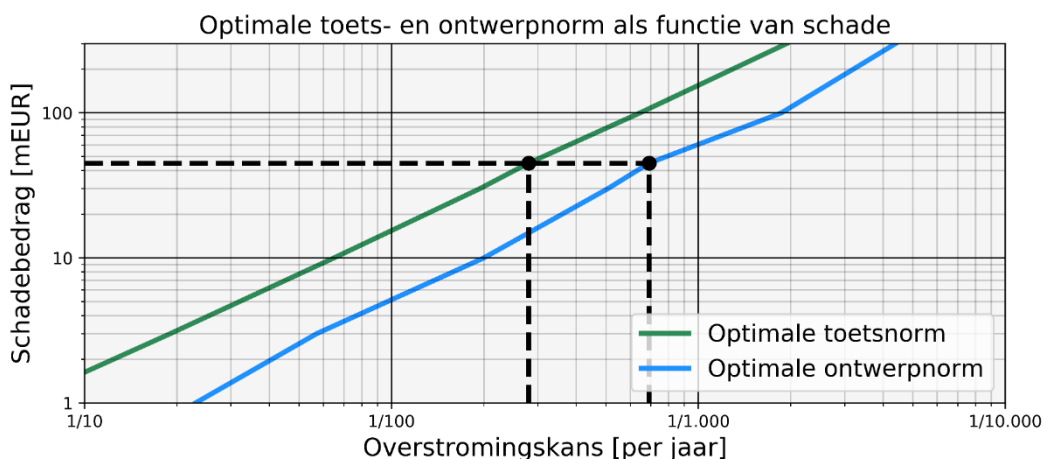
Afbeelding 7.3 De optimale toetsnorm voor het pilotgebied wordt gevonden bij een overstromingskans van 1/280 per jaar



7.4 Acceptabele schade per norm

Op basis van de afleidingen van de optimale ontwerp- en toetsnorm in paragraaf 7.3 voor een schade van EUR 45.000.000,- (zoals berekend in deelvraag 1) kan per schadebedrag een optimale ontwerp- en toetsnorm worden berekend. In afbeelding 7.4 zijn de optimale ontwerp- en toetsnorm berekend voor een variërend schadebedrag. Het schadebedrag van het pilotgebied (EUR 45.000.000,-) is weergegeven met bijbehorende ontwerp- en toetsnorm (1/700 en 1/280 per jaar respectievelijk).

Afbeelding 7.4 Optimale toets- en ontwerpnorm als functie van de schade (de optimale ontwerpnorm verloopt licht geknikt als gevolg van de gehanteerde discrete stapgrootte)



7.5 Knikpunt als gevolg van toepassing damwand

In paragraaf 7.3 is gerekend zonder knikpunten in de kosten. Een knikpunt kan worden veroorzaakt door een sprong in de kosten, bijvoorbeeld omdat een damwand dient te worden toegepast of omdat er een woning dient te worden uitgekocht. Een dergelijk knikpunt zorgt voor een discontinuïteit in de kosten als functie van de norm. In deze paragraaf is aangenomen dat bij een norm hoger dan 1/300 per jaar, een damwand dient te worden toegepast langs 10 % van het tracé. De aangenomen damwand heeft een lengte van 3 maal de kerende hoogte conform de pragmatische '1/3 tot 2/3' vuistregel voor onverankerde damwanden. De kosten van de damwand zijn aangenomen op EUR 120,- per vierkante meter¹. Er is aangenomen dat de onderhoudskosten niet wijzigen. De kosten van de dijkversterking inclusief damwand zijn weergegeven in tabel 7.4.

Tabel 7.4 Aanlegkosten inclusief knikpunt kosten door damwand bij normen strenger dan 1/300 per jaar

Norm [per jaar]	1/10	1/30	1/100	1/300	1/301*	1/1.000	1/3.000	1/10.000
kruinhoogte [m +mv]	1,85	1,90	2,00	2,05	2,05	2,15	2,20	2,30
lengte damwand [m]	0	0	0	0	6,15	6,45	6,60	6,90
kosten damwand [EUR/m]	0	0	0	0	738	774	792	828
kosten profiel inclusief knikpunt damwand [EUR/m]	275	359	471	567	1.301	1.469	1.591	1.775

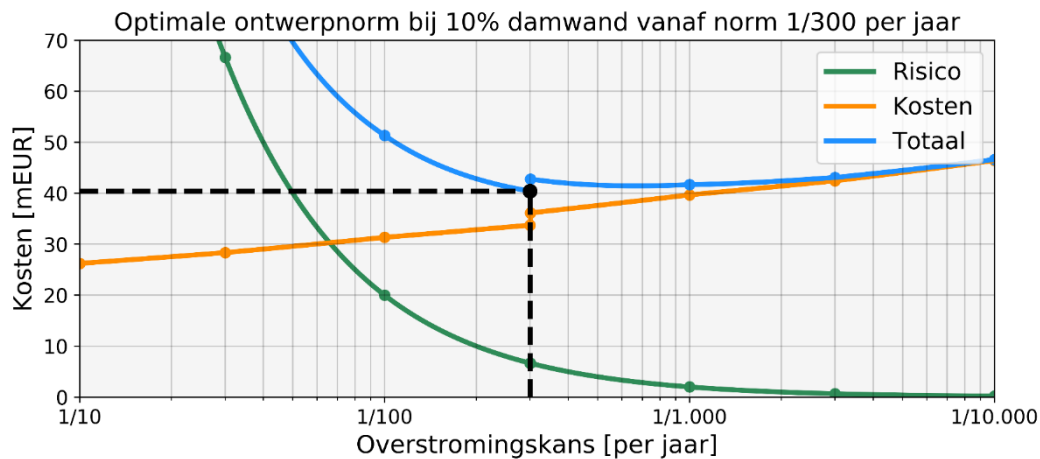
* Extra norm toegevoegd om een sprong te creëren.

¹ Op basis van kostenboeken van lopende dijkversterkingsprojecten.

Als gevolg van de discontinuïteit in de kosten ontstaat een sprong in de kostenlijn en de totaalkostenlijn als functie van de norm rondom de norm 1/300 per jaar, weergegeven in afbeelding 7.5. De optimale ontwerpnorm wordt gevonden vlak voor deze sprong, bij een overstromingskans van 1/300 per jaar.

Deze sprong heeft alleen invloed op het optimum als deze dicht genoeg bij het optimale punt zit. Indien de sprong in kosten bij een norm van 1/100 of 1/10.000 plaatsvindt, dan wijzigt het laagste punt van de curve niet. De optimale overstromingskans blijft dan ongewijzigd.

Afbeelding 7.5 Discontinuïteit in de kosten zorgt voor een optimale ontwerpnorm direct voor de sprong



7.6 Kostenefficiëntie compartimentering pilotgebied

Onder deelvraag 2 (paragraaf 4.1) is de mogelijkheid tot compartimentering van het achterland beschouwd. Als wordt aangenomen dat met en zonder compartimentering hetzelfde overstromingsrisico (kans x schade) in de polder overblijft, dan kunnen de kosten worden vergeleken. Op basis van de kosten is de kostenefficiëntie van de voorgestelde compartimentering beschouwd. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende uitgangspunten bij compartimentering (zoals afgeleid in paragraaf 4.1, afbeelding 4.1):

- er wordt 9,2 km waterkering afgeschaald van 1/100 per jaar naar 1/30 per jaar;
- er wordt 16,8 km waterkering afgeschaald van 1/100 per jaar naar 1/10 per jaar;
- er komt 11,6 km compartimenterende waterkering bij met norm 1/10 per jaar.

De kosten zijn berekend alsof de dijken afgekeurd zijn en er 2 mogelijke versterkingen zijn: met compartimentering en zonder compartimentering. De totale kosten bij toepassing van compartimentering en zonder toepassing van compartimentering zijn weergegeven in tabel 7.5.

Tabel 7.5 Kosten met en zonder compartimentering achterland

Alternatief	Lengte waterkering [km]	Norm [per jaar]	Prijs [EUR/m] (Tabel 7.2)	Kosten totaal [EUR]
met compartimentering	9,2	1/30	1.094	10.064.800
	16,8 + 11,6	1/10	1.010	+28.684.000
totaal met compartimentering				38.748.800
zonder compartimentering	26,0	1/100	1.206	31.356.000

Compartimentering is niet kostenefficiënt voor het pilotgebied, omdat de kosten zonder compartimentering lager zijn. Er is aangenomen dat de compartimenterende waterkeringen als IPO-klasse I kunnen worden

uitgevoerd. Bij een strengere norm voor de compartimenterende waterkeringen zal compartimentering nog minder kostenefficiënt worden.

7.7 Kostenefficiëntie compartimentering buitenwater

Onder deelvraag 2 (paragraaf 4.2.2, afbeelding 4.2) is de mogelijkheid tot compartimentering van Nijegaastervaart beschouwd. Als wordt aangenomen dat met en zonder compartimentering hetzelfde overstromingsrisico overblijft, dan kunnen de kosten worden vergeleken. Op basis van de kosten kan de kostenefficiëntie van de voorgestelde compartimentering worden beschouwd. De aanleg- en onderhoudskosten van een compartimenteringswerk zijn niet bekend en sterk afhankelijk van het gekozen sluitmiddel, inzetfrequentie en onderhoudsregime. Dit is ruw geschat op basis van expert judgement als enkele miljoenen euro's. Er is in tabel 7.6 berekend wat de besparingen zijn als de waterkeringen langs de Nijegaastervaart (lengte 3 km) kunnen worden afgeschaald van IPO-klasse III naar IPO-klasse I. De besparing bedraagt EUR 336.000,--. De kosten van een compartimenteringswerk zijn vrijwel zeker hoger, dus een compartimenteringswerk is niet kostenefficiënt. De kosten van nevenschade als gevolg van mogelijke instabiliteit is hierbij nog niet beschouwd.

Tabel 7.6 Kosten waterkeringen met en zonder compartimentering van de Nijegaastervaart (exclusief kosten compartimenteringswerk)

Alternatief	Lengte waterkering [m]	Norm [per jaar]	Prijs [EUR/m] (tabel 7.2)	Kosten totaal [EUR]
zonder compartimentering	3.000	1/100	1.206	3.618.000
met compartimentering	3.000	1/10	1.094	-3.282.000
besparing				336.000

7.8 Conclusies Maatschappelijke Kosten-Baten Analyses

Op basis van de uitgevoerde analyse wordt geconcludeerd dat:

- op basis van een kosten-batenanalyse kan een optimale ontwerpnorm worden bepaald. De optimale ontwerpnorm beschrijft de laagste totaalkosten als functie van aanlegkosten, onderhoudskosten en waterveiligheidsrisico. De optimale ontwerpnorm voor het pilotgebied is 1/690 per jaar;
- de Netto Contante Waarde (NCW) is weinig gevoelig voor grote variaties in de overstromingskans rond de optimale overstromingskans. Zodoende bezit de ontwerpnorm een ruime bandbreedte als een kleine afwijking (zeg 10%) van de theoretisch optimale NCW wordt geaccepteerd;
- een discontinuïteit in de kosten (bijvoorbeeld als gevolg van een damwand die nodig kan zijn vanaf een zekere norm) leidt tot een andere optimale ontwerpnorm. Vaak zal deze optimale ontwerpnorm vlak voor de sprong in kosten liggen;
- op basis van een kosten-batenanalyse kan een optimale toetsnorm worden bepaald. De optimale toetsnorm beschrijft de faalkans waarboven het risico groter wordt dan de jaarlijkse investeringskosten van een versterking. De optimale toetsnorm voor het pilotgebied is 1/280 per jaar;
- op basis van een vergelijking van de kosten is compartimentering van het achterland en/of van het watersysteem niet kostenefficiënt voor het pilotgebied.

7.9 Reflectie op analyse

De gehanteerde werkwijze in dit hoofdstuk is ervaren als goed toepasbaar. Een belangrijke keuze in de MKBA is de schematisering van de profielen per norm en de bijbehorende kosten.

De aanlegkosten van de dijkprofielen zijn momenteel versimpeld berekend. De benodigde dwarsprofielen en de kosten per dwarsprofiel zijn gebaseerd op eenvoudige berekeningen en aannamen. Het aandeel van de

aanlegkosten in de totaalkosten is echter lager dan verwacht. De onderhoudskosten (per jaar en per 30 jaar) vormen een groter deel van de totale kosten (50% tot 80 %) dan de aanlegkosten (20% tot 50 %). De onderhoudskosten zijn goed herleidbaar gekozen in verband met de aanlegkosten, omdat deze zijn gebaseerd op kentallen van het waterschap en het HWBP. De invloed van keuzen die zijn gemaakt in de bepaling van de aanlegkosten zijn hierdoor beperkter dan vooraf verwacht.



REFERENTIES

- 1 Nationaal Landschap Zuidwest Fryslân (2021). Het verhaal van nationaal landschap Zuidwest Fryslân, Oudermirdum, 2021, URL: <https://nationaallandschap.frl/nationaal-landschap-zuidwest-fryslan/>.
- 2 Wetterskip Fryslân (2021). Ontwerp revisiepeilbesluit Friese Boezem (toelichting), Leeuwarden.
- 3 Wetterskip Fryslân, Leggerkaart: waterstaatswerken, onderhoudsplicht en onderhoudseisen, Leeuwarden, 2021, URL: <https://www.wetterskipfryslan.nl/kaarten/leggerkaart>.
- 4 Aanpassen van bresgroeimodel in HIS-OM. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde (2003).
- 5 Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2021). Schematiseringshandleiding Betrouwbaarheid Sluiten. Versie 3.1.
- 6 STOWA, Deltafact, compartimentering in het boezemsysteem, url: <https://www.stowa.nl/deltafacts/water-veiligheid/innovatieve-dijkconcepten/compartimentering-het-boezemsysteem>, geraadpleegd 15 december 2021.
- 7 STOWA (2015), Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen. Module D: Beoordeling Veiligheid.
- 8 Deltares (2008), Bouwen op slappe bodems.
- 9 CROW kennispartner voor (decentrale) overheden, aannemers en adviesbureaus (2013), Handboek Wegontwerp.
- 10 STOWA (2015), Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen. Module E: Niet waterkerende objecten.
- 11 Rijkswaterstaat, ministerie van infrastructuur en milieu (2015), Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken ROK 1.3.
- 12 InfraQuest (2014): Beoordeling van waterbouwkundige kunstwerken volgens het bouwbesluit en waterwet.
- 13 Deltares (2015). Modelonzekerheidsfactoren Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte. Documentnummer: 1207808-101.
- 14 NEN9997-1+C2 (2017). Geotechnisch ontwerp van constructies -Deel 1: Algemene regels.
- 15 Deltares (2016). Handreiking faalkansanalyse en faalkans updating. Groene versie - Macrostabiliteit binnenwaart. Documentnummer: 11200575-0143.
- 16 Deltares (2017). Reliability updating for slope stability of dikes. Documentnummer: 1230090-033.
- 17 Wetterskip Fryslân (2016). Rapportage stabiliteitstoets regionale waterkeringen Wetterskip Fryslân.
- 18 Deltares (2017). Doorvertaling van bewezen sterkte resultaten naar een dijkvak. Werkwijze en voorbeeldcase. Documentnummer: 11200575-017.
- 19 Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage III Sterkte en veiligheid.
- 20 STOWA (2015). Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen - Module D. STOWA-2015-15.
- 21 STOWA (2015), Leidraad toetsen op veiligheid Regionale waterkeringen - bijlagen.
- 22 NEN (2019), NEN-EN 1990+A1+A1/C2 Eurocode: Grondslagen voor het constructief ontwerp.
- 23 CROW (2004) . Betrouwbaarheid van zettingsprognoses, Ede.
- 24 NEN (2019), NEN-EN 1990+A1+A2/C2/NB; Nationale bijlage voor Grondslagen van het constructief Ontwerp.
- 25 Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2021). Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit.
- 26 Veiligheid Nederland in Kaart (2011). De methode van VNK2 nader verklaard, de technische achtergronden
- 27 Wetterskip Fryslân (2017). Project definitie Oever & kade opgave voor Kadering 103.
- 28 Kennisplatform Risicobenadering (2016). Verkeersbelasting en macrostabiliteit. Versie 2.
- 29 STOWA (2008). Richtlijn normering kering langs regionale rivieren. Rapportnummer: ORK 2008-04.

- 30 Bouwconsult.nl: URL: <https://www.itx-bouwconsult.nl/informatie/kavelprijzen>, geraadpleegd 15 december 2021.
- 31 Inventarisatie beheer- en onderhoudskosten primaire waterkeringen. Basisgegevens voor LCC binnen het HWBP. Triple Bridge B.V. 2014.
- 32 Rijkswaterstaat Economie. URL: <https://www.rwseconomie.nl/discontovoet>, geraadpleegd 15 december 2021.
- 33 STOWA Deltafact - Compartimentering in het boezemsysteem. URL: <https://www.stowa.nl/deltafacts/waterveiligheid/innovatieve-dijkconcepten/compartimentering-het-boezemsysteem>, geraadpleegd 21 december 2021.

Bijlage(n)

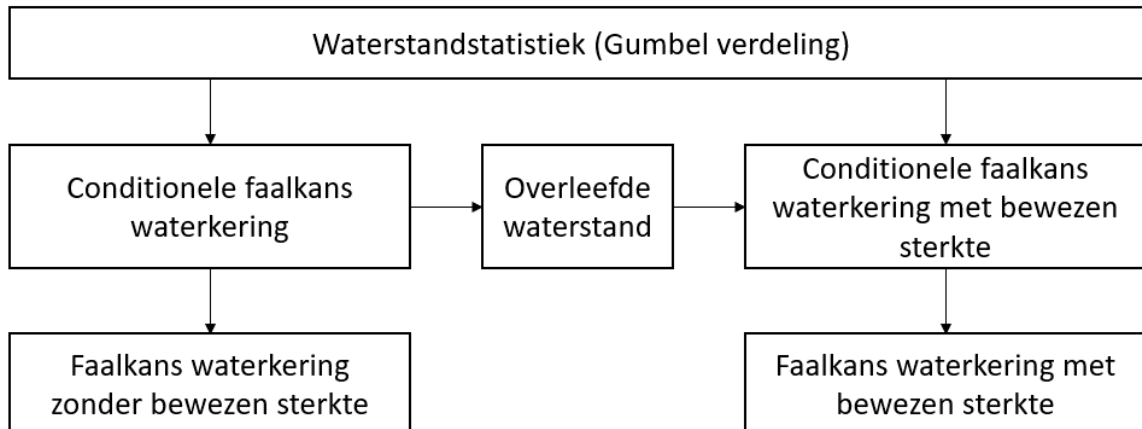


BIJLAGE: PROBABILISTISCHE MACROSTABILITEITSANALYSE MET BEWEZEN STERKTE

I.1 Methode op hoofdlijnen

De in deze pilot gehanteerde methode voor het toepassen van bewezen sterkte in een probabilistische macrostabiliteitsanalyse is weergegeven in afbeelding i.1. Hierbij is waterstandsstatistiek gecombineerd met de conditionele faalkans van de waterkering gegeven een bepaalde waterstand. Deze combinatie leidt tot de totale faalkans van de waterkering voor het faalmechanisme stabiliteit binnenwaarts. De toepassing van bewezen sterkte gebeurt op de verdeling van de conditionele faalkans van de waterkering.

Afbeelding I.1 Methode probabilistische macrostabiliteitsanalyse met en zonder bewezen sterkte



I.2 Waterstandsstatistiek

Voor de waterstandsstatistiek is gebruik gemaakt van bij Wetterskip Fryslân beschikbare waterstanden bij verschillende terugkeertijden. Per uitvoerpunt zijn de waterstanden bij 5 verschillende terugkeertijden beschikbaar (10, 30, 100, 300 en 1000 jaar). Op de waterstand bij een terugkeertijd van 10 en 1000 jaar is een Gumbel-verdeling gefit.

Gumbel, kansdichtsheidsfunctie

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \cdot e^{-(z+e^{-z})}$$

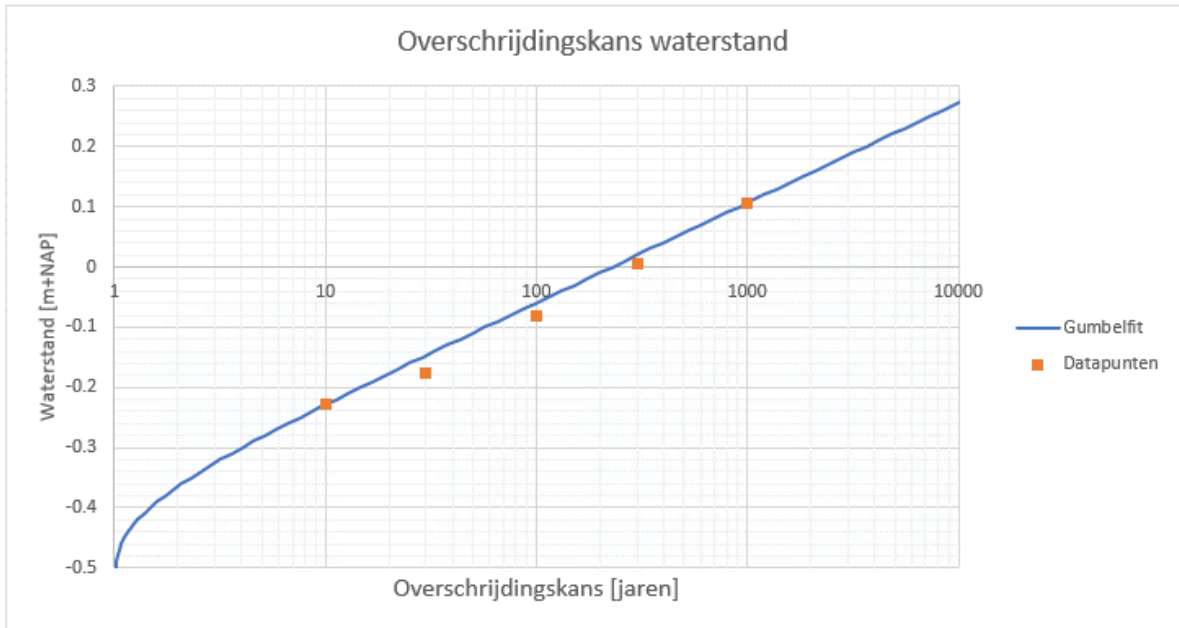
$$z = \frac{x - \mu}{\beta}$$

Gumbel, verdelingsfunctie

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}}$$

Bovenstaande vergelijking is een analytische formule met 2 onbekenden (μ en β) en kan dus exact opgelost worden. Een voorbeeld van een fit is weergegeven in afbeelding i.2

Afbeelding I.2 Gumbel-fit op waterstanden bij terugkeertijd



I.3 Probabilistische faalkansbepaling

Voor de probabilistische faalkansbepaling is de waterstandsstatistiek gecombineerd met de faalkans van de kering gegeven een bepaalde waterstand:

$$p(f_{STBI}) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(h) \cdot p(f_{STBI}|h) dh$$

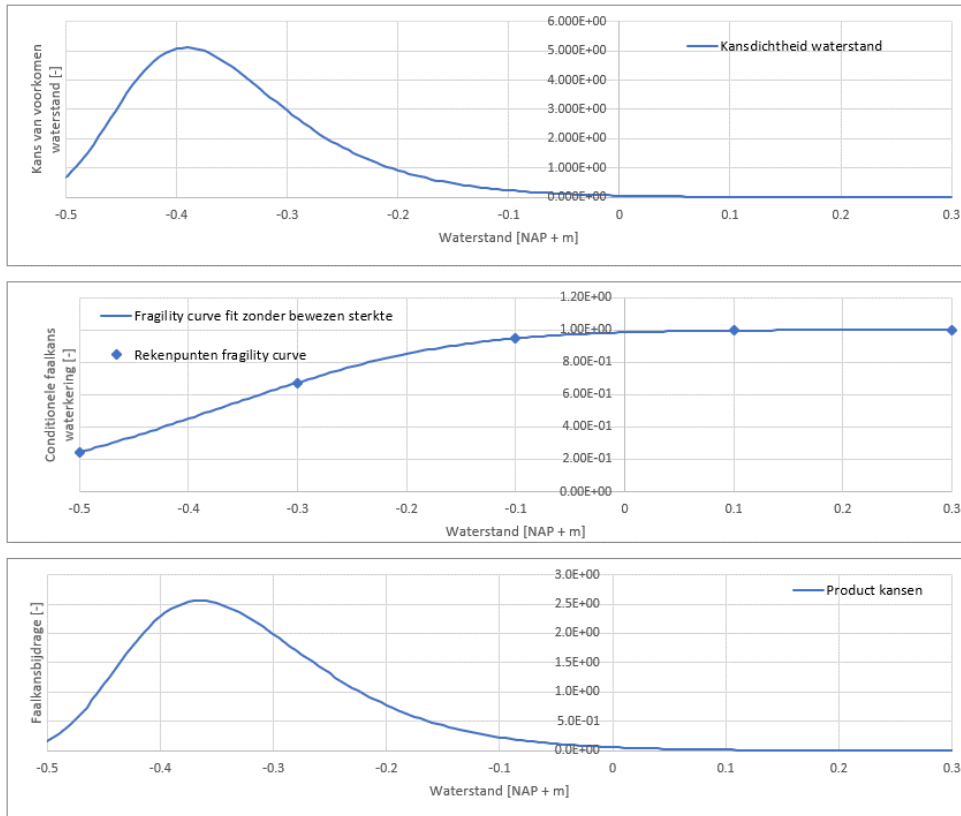
Waarin:

- $p(f_{STBI})$ faalkans waterkering voor het faalmechanisme STBI [-];
- $p(h)$ kansdichtheid waterstand h [-];
- $p(f_{STBI}|h)$ faalkans waterkering voor het faalmechanisme STBI gegeven waterstand h [-].

De bepaling van de faalkans is visueel weergegeven in afbeelding i.3.

- 1 in de bovenste figuur is de kansdichtheid van de waterstand weergegeven (de Gumbelverdeling);
- 2 in de middelste figuur is de conditionele faalkans van de waterkering (gegeven een bepaalde waterstand) weergegeven. In de figuur zijn de rekenpunten en de interpolatie (doorgetrokken lijn) weergegeven. De waardes tussen de rekenpunten zijn geïnterpoleerd op basis van beta en niet op basis van de faalkansen [ref. 16];
- 3 in de onderste figuur is het product van de figuren (1) en (2) weergegeven. De integraal van deze grafiek is de totale faalkans van de waterkering voor het faalmechanisme STBI. De integraal is per halve cm bepaald.

Afbeelding I.3 Bepaling faalkans



I.4 Bewezen sterkte

Om het effect van 'bewezen sterkte' toe te passen is kennis van overleefde waterstanden geïmplementeerd. Hiervoor is de cumulatieve kansverdelingsfunctie van de conditionele faalkans van de kering aangepast (getrunceerd).

De volgende statistische bewerking is toegepast voor een overleefde opgetreden waterstand h :

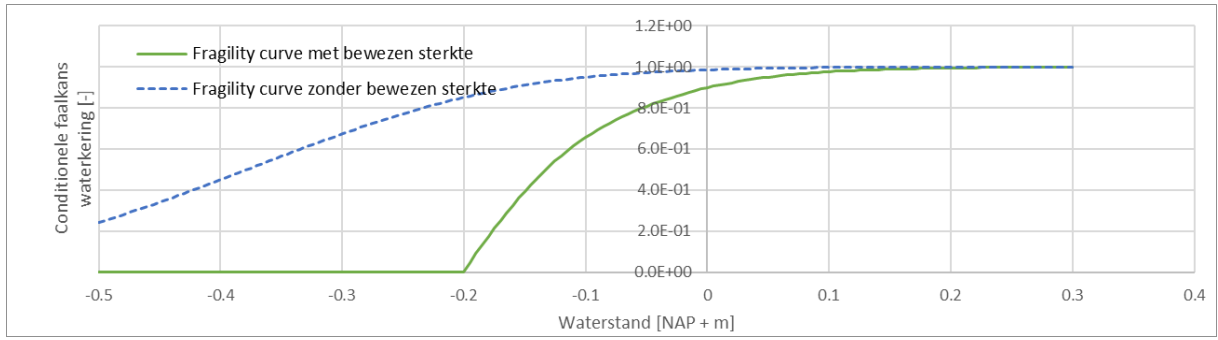
$$G(x) = \frac{F(x) - F(h)}{1 - F(h)}$$

Waarin:

- $G(x)$ cumulatieve faalkans bij waterstand x met overleefde waterstand h [-];
- $F(x)$ cumulatieve (initiële) faalkans bij waterstand x zonder overleefde waterstand [-];
- $F(h)$ cumulatieve (initiële) faalkans bij waterstand h zonder overleefde waterstand [-].

Een voorbeeld van het toepassen van bewezen sterkte is weergegeven in afbeelding i.4. In het voorbeeld is de initiële faalkansverdeling (blauw gestreepte lijn) aangepast aan de hand van een overleefde waterstand van NAP -0,2 m. Deze begrenzing leidt tot een aangepaste cumulatieve verdelingsfunctie (groene doorgetrokken lijn).

Afbeelding I.4 Truncatie cumulatieve verdelingsfunctie





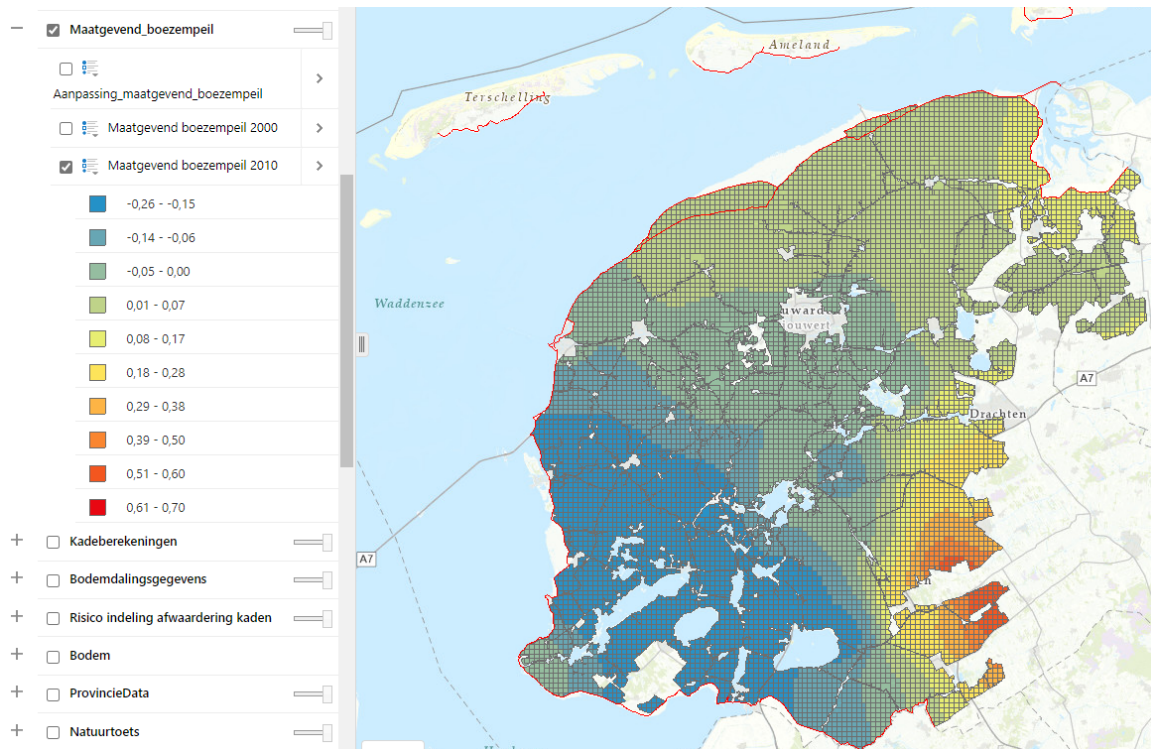
BIJLAGE: FOTO-IMPRESSIE PILOTGEBIED VELDBEZOEK



BIJLAGE: MAATGEVEND BOEZEMPEIL

Het maatgevend boezempeil bij het pilotgebied is circa NAP -0,2 m. Voor het toetsen en ontwerpen van boezemkeringen wordt een onzekerheidsmarge van 20 cm gehanteerd. Totaal komt dit dus neer op een toetspeil van circa NAP +0 m.

Afbeelding III.1 Maatgevend boezempeil



IV

BIJLAGE: MEMO GEDIFFERENTIEERD NORMEREN

NOTITIE

Onderwerp Verkenning gedifferentieerd normeren
Project Onderzoek regionale normering
Opdrachtgever Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA)
Projectcode 128187
Status Definitief
Datum 6 april 2022
Referentie 128187/22-005.203
Auteur(s) ir. D.G. Fiolet

Gecontroleerd door G.P. van Rinsum MSc
Goedgekeurd door G.P. van Rinsum MSc
Paraaf

Bijlage(n) -

Aan Stichting Toegepast Onderzoek H. van Hemert
Waterbeheer (STOWA)

Kopie -

1 INLEIDING EN DOEL

Als onderdeel van een onderzoek naar de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen is in 2021 een pilotonderzoek gedaan voor de situatie “Boezemkade – landelijk” [ref. 1]. In dit pilotonderzoek is gekeken naar verschillende aspecten van deze regionale waterkering:

- schadeberekeningen en kosten-batenanalyses;
- systeemmaatregelen;
- maatgevende eisen vanuit beheer en onderhoud of medegebruiksobjecten;
- overstromingskansbenaderingen.

Als aanvulling op dit onderzoek is eind 2021 een aanvullende vraag gesteld over gedifferentieerd normeren. Gedifferentieerd normeren bestaat uit het toepassen van een separate norm voor verschillende faalmechanismen. Voor regionale waterkeringen zijn hoogte en macrostabiliteit de meest relevante faalmechanismen (samen 90 % van de faalkansruimte in de huidige systematiek [ref. 2]). Bij gedifferentieerd normeren wordt voor de mechanisme hoogte een andere norm gehanteerd dan voor de mechanisme macrostabiliteit. In voorliggend memo zijn het concept van gedifferentieerd normeren en de eventuele toepassing voor de pilot “Boezemkade – landelijk” onderzocht. Dit memo vormt een aanvulling op het pilotonderzoek “Boezemkade – landelijk” [ref. 1].

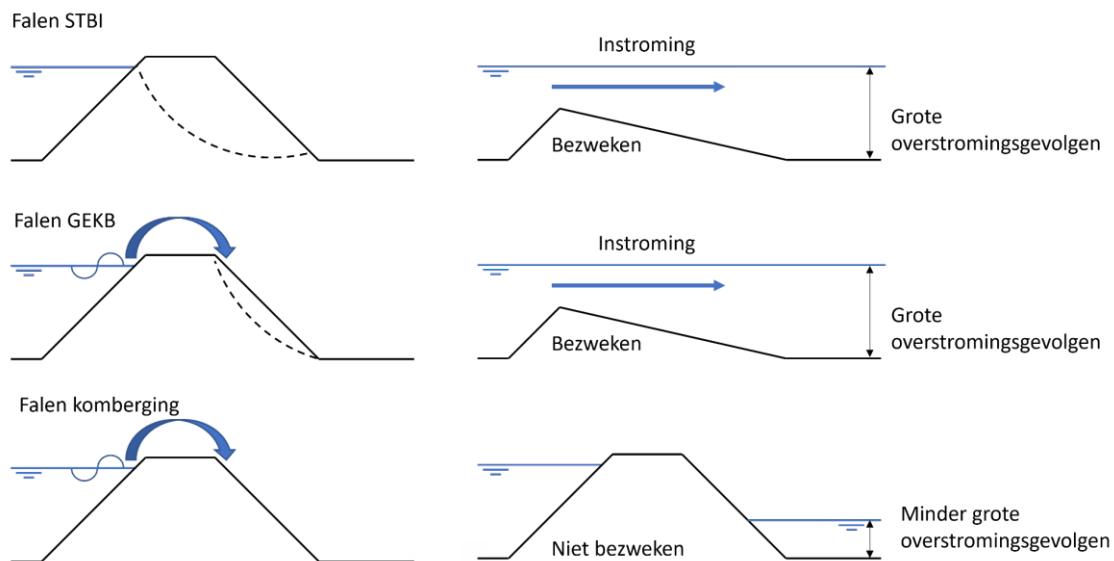
2 FALEN MET EN ZONDER BEZWIJKEN

Wanneer macro-instabiliteit (STBI) optreedt, faalt een waterkering omdat het grondlichaam bezwijkt. Na het bezwijken van het grondlichaam (inclusief eventuele reststerkte) ontstaat een bres en treedt instroming van het buitenwater op. Deze instroming leidt tot een overstroming.

Voor hoogte kan onderscheid worden gemaakt tussen 2 wijzen van falen:

- falen **met** bezwijken waterkering (bres ten gevolge van graserosie kruin en binnentalud):
 - voor falen op hoogte met bezwijken, bezwijkt het grondlichaam na het falen van de bekleding op de kruin of het binnentalud en hierna erosie. Na het bezwijken van het grondlichaam ontstaat een bres en treedt instroming op. Deze instroming leidt tot een overstroming;
- falen **zonder** bezwijken waterkering (geen bres, maar overschrijden kombergend vermogen):
 - voor falen op hoogte zonder bezwijken bezwijkt het grondlichaam niet. Er ontstaat geen bres, maar het overslag- of overloopdebiet leidt direct tot instroming en een overstroming;
 - bij falen zonder bezwijken treedt potentieel minder instroming op dan bij falen met bezwijken. Dit is weergegeven in afbeelding 2.1:
 - het grondlichaam bezwijkt niet, waardoor de instroming beperkt wordt. De instroming als gevolg van overslag of overloop is minder in vergelijking met een bezweken grondlichaam;
 - de waterkering behoudt zijn waterkerende functie (hoewel mogelijk wel minder sterk door saturatie). Dit betekent dat zodra de belasting weer afneemt naar dagelijkse condities (na de storm), de instroming stopt. Bij falen met bezwijken blijft mogelijk ook onder dagelijkse condities instroming optreden door de bres.

Afbeelding 2.1 Falen met bezwijken als gevolg van STBI (boven), GEKB (midden) en komberging (onder)



De maximaal toelaatbare overstromingskans van een waterkering is gerelateerd aan het overstromingsrisico. Het overstromingsrisico bestaat uit de kans op overstroming vermenigvuldigd met de effecten van een overstroming (risico = kans x schade). Indien de effecten van een overstroming kleiner zijn bij falen zonder bezwijken kan mogelijk een grotere overstromingskans worden toegelaten om tot hetzelfde overstromingsrisico te komen. De economische optimale hoogte (of: de optimale kans op overstroming zonder bezwijken) kan anders zijn dan de economisch optimale sterkte (of: de optimale kans op overstromingskans met bezwijken). Dit kan komen door zowel het verschil in schade, als het verschil in kosten om de betreffende kans te verkleinen.

3 OVERSTROMINGSSCHADE NA FALEN MET EN ZONDER BEZWIJKEN

De toelaatbare overstromingskans van een waterkering is binnen de huidige spelregels' voor het bepalen van IPO-klassen, alleen gerelateerd aan de schade die optreedt als de waterkering faalt. Aan deze 'spelregels' ligt een economische beschouwing ten grondslag waarin is gezocht naar de *overstromingskans* waarbij de contante waarde van de *investeringskosten* en het product van kans en schade minimaal is. Uitgaande van veronderstellingen ten aanzien van:

- 1 de relatie tussen overstromingskans en investeringskosten;
- 2 de relatie tussen overstromingskans en overschrijdingskans.

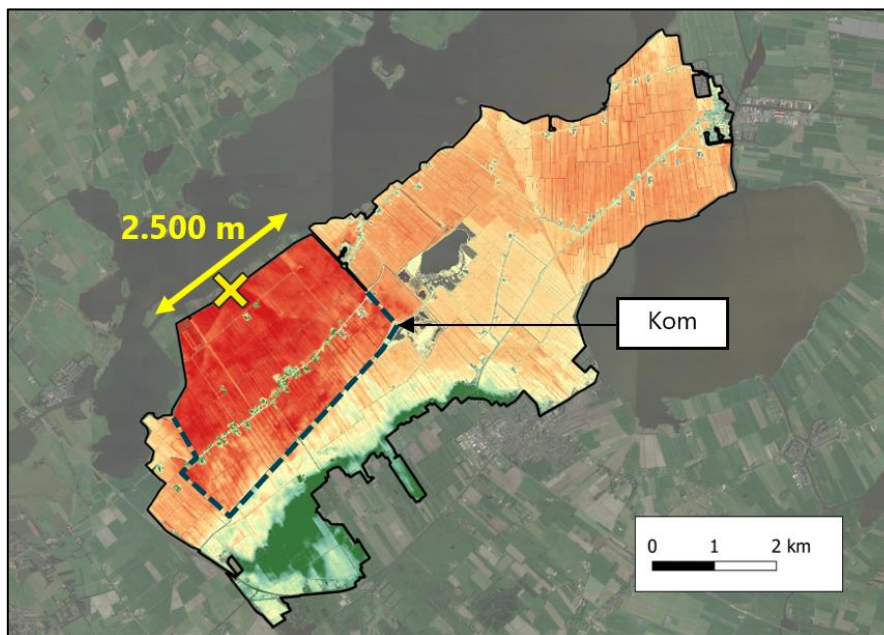
volgt hieruit een economisch optimale overschrijdingskans. Indien minder overstromingsschade optreedt, kan een hogere kans op overstroming toelaatbaar zijn. In dit hoofdstuk (3) is daarom de overstromingsschade berekend die optreedt bij falen met bezwijken en falen zonder bezwijken. Bij falen met bezwijken is voor de relatie tussen schade en toelaatbare kans gebruik gemaakt van de IPO-systematiek. Bij falen zonder bezwijken is deze relatie niet toepasbaar en zijn toelaatbare kansen aangenomen.

De schade als gevolg van falen met bezwijken is berekend voor een breslocatie langs het Fluessen, weergegeven in afbeelding 3.1 [ref. 1]. Achter de waterkering ligt een kom in het achterland met een constante, kerende hoogte. Het instromend water kan in eerste instantie alleen in deze aanwezige kom verspreiden (tot de binnenwaterstand hoog genoeg wordt en het water uit de kom kan treden).

De schade als gevolg van falen zonder bezwijken is in dit hoofdstuk berekend voor dezelfde locatie. Er zijn zodoende 2 scenario's vergeleken:

- schadeontwikkeling als gevolg van **falen met bezwijken** met bresvorming op de aangegeven locatie. De breedte van het bres en de optredende instroming zijn berekend als functie van het verval in [ref. 1];
- schadeontwikkeling als gevolg van **falen zonder bezwijken** langs dit deel van de waterkering. Omdat de hydraulische belasting langs dit deel van de waterkering volledig afhankelijk is, zal overslag of overloop optreden langs de gehele sectie van 2.500 m (gegeven een constante kruinhoogte). Instroming in andere delen van de polder is voor deze analyse niet beschouwd.

Afbeelding 3.1 Instroming breslocatie 1 met de ligging van de bres bij het gele kruis

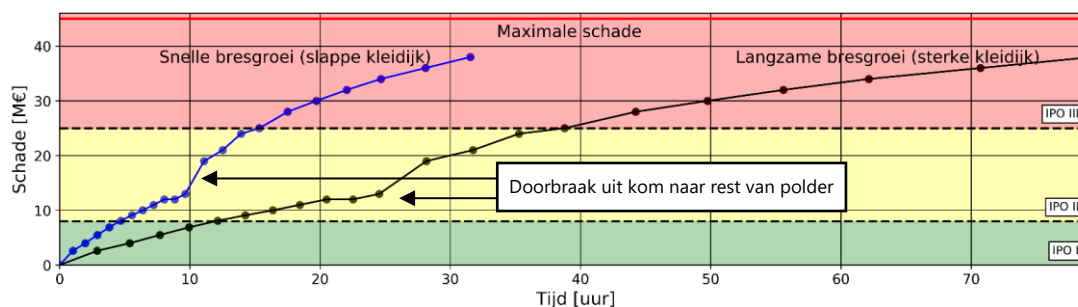


3.1 Falen met bezwijken

De overstromingsschade als gevolg van bresvorming (falen met bezwijken) in het pilotgebied is berekend [ref. 1]. De resulterende schadeontwikkeling over tijd is weergegeven in afbeelding 3.2:

- de maximale schade bedraagt EUR 38.000.000,-- na circa 30 tot 80 uur aan instroming (afhankelijk van de snelheid waarmee de bres groeit). Deze schade valt in IPO-klasse III;
- tot circa 10 à 24 uur blijft de inundatie beperkt tot de kom. Hierna inundeert de rest van de polder en stijgt de schade snel verder.

Afbeelding 3.2 Ontwikkeling schade als gevolg van falen met bezwijken [ref. 1]



3.2 Falen zonder bezwijken

Er is een nieuwe schadeberekening uitgevoerd voor falen zonder bezwijken. Dit betekent dat er alleen instroming optreedt als gevolg van overslag/overloop (hierna: instroming). De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

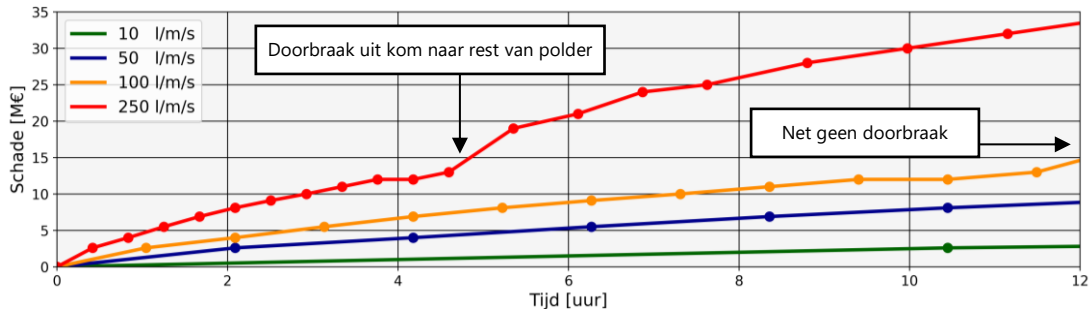
- er treedt overslag of overloop op over een breedte van 2.500 m;
- het instromend debiet is afhankelijk van de hydraulische belasting en de kruinhoogte. De kruinhoogte van de waterkering is nog niet bekend (deze volgt namelijk uit de potentiële schade, de toelaatbare overstromingskans en een kosten-batenanalyse van de versterkingskosten);
- er zijn daarom 4 scenario's doorgerekend: de schade bij 10, 50, 100 en 250 l/m/s. Dit zijn mogelijke overslagdebieten die kunnen optreden (over een waterkering met een overslagdebiet van 10 l/m/s kan ook 50 l/m/s overslaan als de belasting toeneemt). **Omdat de kruinhoogte van de waterkering nog niet is bepaald, is nog niet te zeggen wat de daadwerkelijke (verwachtingswaarde) van het optredende overslagdebiet (en resulterende schade) is;**
- de instroming treedt gedurende een stormduur van 12 uur op. Na 12 uur neemt de belasting af naar dagelijkse omstandigheden en treedt geen instroming meer op. De waterkering is immers niet bezwaken gedurende de storm.

De schadeontwikkeling is weergegeven in afbeelding 3.3 voor verschillende debieten:

- de totale schade is sterk afhankelijk van het instromend debiet. Bij een debiet van 250 l/m/s loopt de schade op tot EUR 34.000.000,-- , omdat de inundatie niet beperkt blijft tot de kom¹. Deze schade is niet in te delen in een IPO-klasse, omdat de economische beschouwing die ten grondslag ligt aan de IPO-normering niet geldig is voor falen zonder bezwijken;
- bij de lagere debieten blijft de inundatie beperkt tot de kom en blijft de schade significant lager. Het overstromen van de kom leidt zodoende tot knikpunten in de schadeontwikkeling. De schade per debiet is weergegeven in tabel 3.2.

¹ Dit betekent ook dat het totale instromend volume mogelijk wordt onderschat, omdat de instromende breedte dan groter is dan de breedte van de kom. Indien de waterkeringen naast de kom even hoog zijn dragen deze ook bij aan het instromend volume.

Afbeelding 3.3 Ontwikkeling schade als gevolg van falen zonder bezwijken met verschillende mogelijk optredende debieten



3.3 Vergelijking falen schade met bezwijken en zonder bezwijken

In tabel 3.1 en tabel 3.2 is de schade weergegeven als gevolg van instroming. Voor falen zonder bezwijken is de schade behorende bij 12 uur durende instroming weergegeven en voor falen met bezwijken is de totale maximale schade gehanteerd (zonder limiet op de duur van de instroming). Voor falen met bezwijken is de vereiste betrouwbaarheid van een regionale waterkering uit te drukken in IPO-klassen met bijbehorende toelaatbare faalkansen, waarbij een hogere schade leidt tot een strengere IPO-klasse [ref. 2]. Dit is weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Schade als gevolg van instroming bij falen met bezwijken

Falen	Specifiek debiet [l/m/s]	Instromende breedte [m]	Schade [EUR]	IPO-klasse	Toelaatbare kans schade [jaar ⁻¹]
met bezwijken	circa 3.500*	25 - 125**	38.000.000,--	III	1/100 o.b.v. IPO III

* Zolang de stroming volkomen is. Het debiet neemt af zodra onvolkomen stroming optreedt als gevolg van stijging van de binnenwaterstand, maar dit gebeurt pas als de polder bijna volledig overstroomd is (voor berekening zie [ref. 1]).

** Dit betreft de breedte van het bres. Deze groeit over tijd als functie van het verval (voor berekening zie [ref. 1]).

Voor falen zonder bezwijken is de betrouwbaarheid van een regionale waterkering niet uit te drukken in IPO-klassen. De IPO-klassen zijn gebaseerd op een kosten-baten afweging, die niet zonder meer opgaat in het geval van falen zonder bezwijken. De relatie tussen optredende schade, versterkingskosten en toelaatbare kans dient daarom in een nieuwe MKBA afgewogen te worden om tot nieuwe IPO-classificeringen te komen. Dit valt niet binnen de scope van voorliggend memo. Er zijn daarom toelaatbare kansen aangenomen per schadebedrag. Dit is weergegeven in tabel 3.2.

Tabel 3.2 Schade als gevolg van instroming bij falen zonder bezwijken (de schade is afhankelijk van het optredend overslagdebiet)

Falen	Specifiek debiet [l/m/s]	Instromende breedte [m]	Schade [EUR]	IPO-klasse	Toelaatbare kans [jaar ⁻¹]
zonder bezwijken	indien 10 l/m/s optreedt:	2.500	3.000.000,--	n.v.t.	aanname: 1/10
	indien 50 l/m/s optreedt:	2.500	9.000.000,--	n.v.t.	aanname: 1/30
	indien 100 l/m/s optreedt:	2.500	13.000.000,--	n.v.t.	aanname: 1/50
	indien 250 l/m/s optreedt:	2.500	34.000.000,--	n.v.t.	aanname: 1/100

De verschillen tussen falen met bezwijken en falen zonder bezwijken kunnen worden samengevat:

- de instroming bij falen met bezwijken treedt op als gevolg van bresvorming. De instroming bij falen zonder bezwijken treedt op als gevolg van overslag en overloop;
- **het debiet per strekkende meter is lager** bij falen zonder bezwijken dan bij falen met bezwijken;
- **de breedte waarover instroming optreedt is groter** bij falen zonder bezwijken dan bij falen met bezwijken, omdat de lengte waarover de belasting afhankelijk is meestal groter is dan de bresgrootte die optreedt bij falen met bezwijken;
- **de instroming is van kortere duur** bij falen zonder bezwijken dan bij falen met bezwijken, omdat de instroming snel afneemt zodra de belasting daalt naar dagelijkse omstandigheden (na de storm). Als bresvorming optreedt kan instroming blijven optreden, ook als de belasting daalt naar dagelijkse omstandigheden;
- het is locatieafhankelijk hoe de schadeontwikkeling verhoudt tussen falen zonder bezwijken en falen met bezwijken. Falen zonder bezwijken leidt tot een lagere instroming per stekende meter en kortere duur, maar ook een langere breedte waarover instroming optreedt. Heel algemeen kan worden gesteld:
 - voor **lange afhankelijke dijkstrekkings** leidt de grotere lengte tot **meer** instroming bij falen zonder bezwijken;
 - voor **kortere dijkstrekkings** leidt de kortere duur tot **minder** instroming bij falen zonder bezwijken;
- bij een grotere instroming (totaal volume) kan naast schade binnen de pilotgebied als gevolg van instroming ook schade optreden buiten het pilotgebied, zoals schade aan kaden of buitentaluds als gevolg van een val van de waterstand. Deze indirecte schade als gevolg van een val van de buitenwaterstand is niet meegenomen in de schadeberekeningen in dit memo.

4 BEPALING KRUINHOOGTE

Voor zowel falen met bezwijken als falen zonder bezwijken is de vereiste kruinhoogte berekend in PROMOTOR, aan de hand van het overslagdebiet en de toelaatbare kans. Vanwege de beperkte golfhoogte treedt een overslagdebiet van meer dan 10 l/m/s alleen op bij overloopsituaties (ook voor locaties langs de meren, waar hogere golven te verwachten zijn dan in de watergangen). PROMOTOR kan geen overloophoogte berekenen, daarom is de overloophoogte handmatig berekend voor verschillende overloopdebieten in paragraaf 4.1.

4.1 Berekening overloopdebiet

De overloophoogte is berekend in tabel 4.1 met onderstaande formule [ref. 3]:

$$q = 1,7h_0^{3/2} \rightarrow h_0 = \left(\frac{q}{1,7}\right)^{2/3}$$

Waarin:

- q het overloopdebiet [$m^3/s/m$];
 h_0 de overloophoogte (buitenwaterstand - kruinhoogte) [m].

Tabel 4.1 Overloophoogte als functie van overloopdebiet

Overloopdebiet [l/m/s]	Overloophoogte [m]
50	0,10 m
100	0,15 m
250	0,28 m

4.2 Falen met bezwijken

In tabel 4.2 is de benodigde kruinhoogte berekend voor falen met bezwijken:

- de toelaatbare overstromingskans bedraagt 1/100 per jaar. Er is geen faalkansruimte verdeeld om de som zo eenvoudig mogelijk te houden (de overstromingskans is volledig aan hoogte 'gegeven');
- het kritieke overslagdebiet beschrijft de sterkte die aan het binnentalud wordt toegewezen. De vereiste kruinhoogte is afhankelijk van de keuze voor het kritieke debiet (op basis van de sterkte die kan worden toegewezen aan het binnentalud);
- een overslagdebiet hoger dan 10 l/m/s kan alleen optreden tijdens overloopsituaties. De terugkeertijd van overloopsituaties kan echter niet in PROMOTOR worden berekend. De extra overloophoogte zoals berekend in tabel 4.1 is daarom afgetrokken van de vereiste kerende hoogte bij 10 l/m/s om tot de vereiste kerende hoogte bij hogere overslagdebieten te komen;
- een lagere sterkte van de bekleding op het binnentalud (uitgedrukt in het kritieke debiet) leidt tot een strengere eis voor de kruinhoogte.

Tabel 4.2 Berekende benodigde kruinhoogte bij falen met bezwijken

Kritiek debiet [l/m/s]	Toelaatbare overstromingskans op basis van schade [per jaar]	Overloophoogte (op basis van tabel 4.1)	Kruinhoogte [m+NAP]
indien binnentalud 10 l/m/s aan kan	1/100	0	-0,12
indien binnentalud 50 l/m/s aan kan	1/100	0,10	-0,12 - 0,10 = -0,22
indien binnentalud 100 l/m/s aan kan	1/100	0,15	-0,12 - 0,15 = -0,27
indien binnentalud 250 l/m/s aan kan	1/100	0,28	-0,12 - 0,28 = -0,40
indien binnentalud nooit bezwijkt	1/100	-	geen eis

4.3 Falen zonder bezwijken

In tabel 4.3 is de benodigde kruinhoogte berekend voor falen zonder bezwijken:

- de toelaatbare overschrijdingskans (de kans van optreden) varieert met het overslagdebiet, omdat de resulterende schade groter is bij grotere overslagdebieten. Er is geen faalkansruimte verdeeld om de som zo eenvoudig mogelijk te houden (de kansruimte is volledig aan hoogte 'gegeven');
- de vereiste kruinhoogte is afhankelijk van zowel het debiet als de toelaatbare overschrijdingskans;
- bij een **stijgend** kritiek debiet **daalt** de toelaatbare overschrijdingskans en de vereiste kruinhoogte, maar een **dalende** toelaatbare overschrijdingskans leidt weer tot een **hogere** de vereiste kruinhoogte. Dit leidt ertoe dat alle overslagdebieten geëvalueerd dienen te worden, omdat de maatgevende combinatie van debiet en toelaatbare overschrijdingskans niet vooraf kan worden voorspeld en afhankelijk is van eventuele locatiespecifieke knippunten (zoals het overstromen van de rest van de polder, zie afbeelding 3.3).

Tabel 4.3 Berekende benodigde kruinhoogte bij falen zonder bezwijken (gegeven bekleding sterk genoeg)

Overslagdebiet [l/m/s] (gegeven dat het binnentalud niet bezwijkt)	Aangenomen toelaatbare overschrijdingskans (tabel 3.2) [per jaar]	Kruinhoogte bij 10 l/m/s in combinatie met toelaatbare kans vorige kolom [per jaar]	Overloophoogte (tabel 4.1)	Kruinhoogte [m+NAP]
indien 10 l/m/s optreedt:	1/10	-0,26	0	-0,26
indien 50 l/m/s optreedt:	1/30	-0,21	0,10	-0,21 - 0,10 = -0,31
indien 100 l/m/s optreedt:	1/50	-0,17	0,15	-0,17 - 0,15 = -0,32

Overslagdebiet [l/m/s] (gegeven dat het binnentalud niet bezwijkt)	Aangenomen toelaatbare overschrijdingskans (tabel 3.2) [per jaar]	Kruinhoogte bij 10 l/m/s in combinatie met toelaatbare kans vorige kolom [per jaar]	Overloop- hoogte (tabel 4.1)	Kruinhoogte [m+NAP]
indien 250 l/m/s optreedt:	1/100	-0,12	0,28	-0,12 - 0,28 = -0,40

4.4 Vergelijking kruinhoogte voor falen met bezwijken en falen zonder bezwijken

4.4.1 Kruinhoogte falen met bezwijken

Voor falen met bezwijken dient de kruinhoogte te voldoen aan de kruinhoogte die hoort bij het maatgevende kritieke debiet. Dit is het laagste kritieke debiet dat kan worden toegewezen aan de sterkte van de bekleding op het binnentalud van de waterkering (inclusief onzekerheden, et cetera):

- indien wordt aangenomen dat het binnentalud van de waterkering sterk genoeg is om een debiet van 50 l/m/s aan te kunnen, dan dient de kruinhoogte minimaal NAP -0,22 m te zijn;
- indien wordt aangenomen dat het binnentalud van de waterkering sterk genoeg is om een debiet van 100 l/m/s aan te kunnen, dan dient de kruinhoogte minimaal NAP -0,27 m te zijn.

4.4.2 Kruinhoogte falen zonder bezwijken

Voor falen zonder bezwijken dient de kruinhoogte te voldoen voor alle mogelijk debieten in tabel 4.3. Alle overslagdebieten hebben immers een kans van voorkomen en leiden elk tot een andere schadeontwikkeling (en dus een andere toelaatbare kans). Het rekenen met het laagste debiet leidt zodoende niet altijd tot de strengste eis voor de kruinhoogte (in tabel 4.3 is dit overigens wel het geval). De kruinhoogte dient zo gekozen te zijn dat de kans van voorkomen voor elk debiet lager is dan de toelaatbare kans van de bijbehorende schade.

5 INTERACTIE TUSSEN FALEN MET BEZWIJKEN EN ZONDER BEZWIJKEN

Falen zonder bezwijken **op hoogte** kan leiden tot falen met bezwijken **op macrostabiliteit van het binnentalud** als gevolg van verzadiging:

- als falen zonder bezwijken optreedt stroomt er water over de kruin, maar erodeert het binnentalud niet;
- er treedt echter wel mogelijk infiltratie van dit water in het grondlichaam op, wat leidt tot een verhoging van de freatische lijn;
- deze verhoging van de waterspanningen leidt tot een grotere kans op (onder andere) macro-instabiliteit, waardoor mogelijk falen met bezwijken optreedt.

Om het effect van vernatting te beschouwen zijn 2 stabiliteitssommen opgesteld:

- falen met bezwijken, waarin hoogte en stabiliteit beiden aan 1/100 per jaar zijn beoordeeld;
- falen zonder bezwijken, waarin de hoogte is beoordeeld aan 1/10 per jaar (de kruinhoogte is verlaagd naar NAP -0,26 m, zie tabel 4.3), maar macrostabiliteit aan 1/100 per jaar met een volledig verzadigd grondlichaam als gevolg van de vernatting.

Er is gebruik gemaakt van de bestaande stabiliteitssommen uit het pilotonderzoek "Boezemkade – landelijk" [ref. 1]. De stabiliteitssom op locatie KR103-123 is gehanteerd, omdat deze in de buurt ligt van de beschouwd breslocatie in hoofdstuk 4 en omdat deze een stabiliteitsfactor heeft die dicht bij de vereiste stabiliteitsfactor van 0,9 ligt [ref. 1] en restbreedte dus een verwaarloosbare invloed heeft.

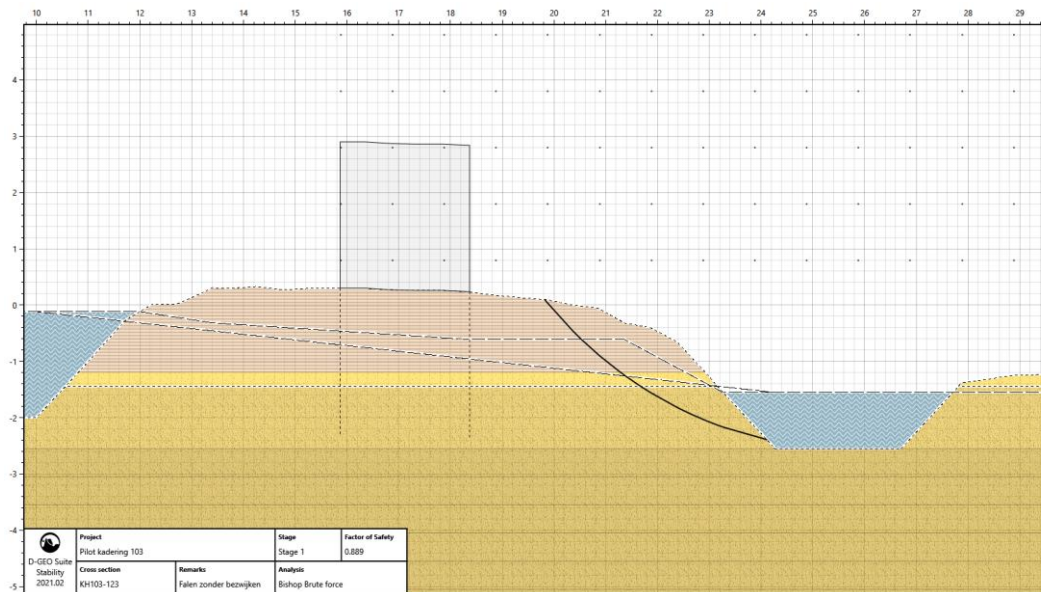
5.1 Macrostabiliteit bij falen met bezwijken

Bij falen met bezwijken is de bestaande stabiliteitssom overgenomen uit [ref. 1], zonder aanpassing van de invoerparameters. In deze som zijn een aantal 'constraints' opgelegd om ondiepe glijcirkels te voorkomen, welke zijn overgenomen:

- een minimale diepte van de glijcirkel van 1,0 m;
- de glijcirkel moet de kruin snijden.

Het profiel inclusief maatgevende glijcirkel is weergegeven in afbeelding 5.1. De stabiliteitsfactor voldoet (zo goed als) aan de eis van 0,9.

Afbeelding 5.1 Stabiliteitsfactor bij falen met bezwijken is 0,89



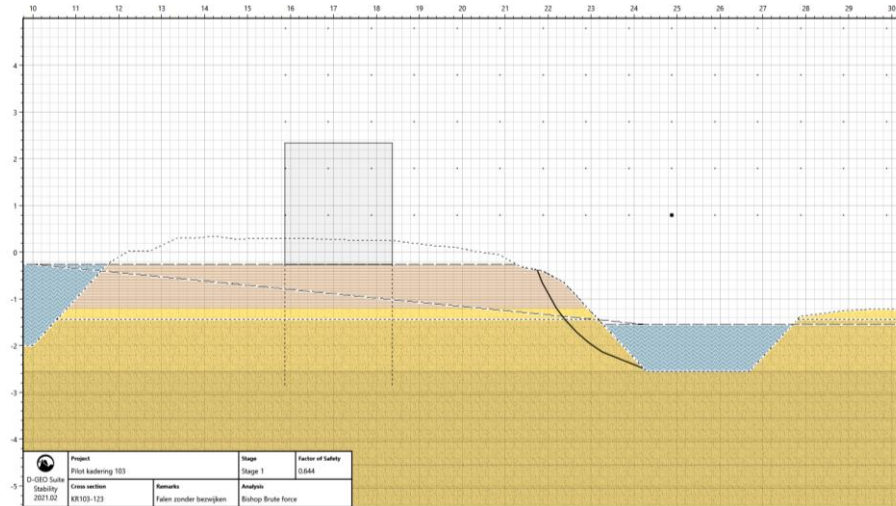
5.2 Macrostabiliteit bij falen zonder bezwijken

Bij falen zonder bezwijken zijn de volgende aanpassingen gedaan aan de stabiliteitssom:

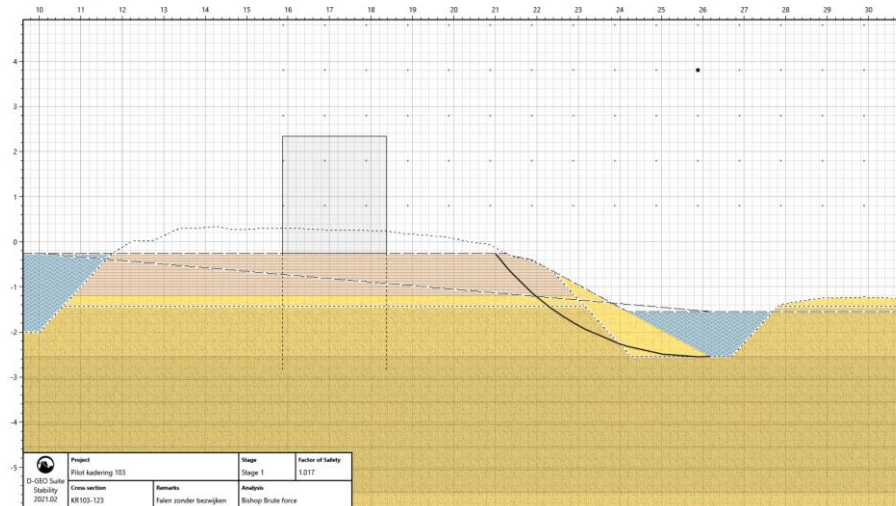
- de kruinhoogte is verlaagd naar NAP -0,26 m;
- de buitenwaterstand is verlaagd naar NAP -0,26 m;
- de freatische lijn volgt het dijktaalud exact (volledig verzadigd);
- de 'constraints' zijn uitgetzet, omdat ondiepe glijvlakken leiden tot falen van de bekleding. Bij het falen van de bekleding is het onwaarschijnlijk dat de hogere overslagdebieten niet tot erosie leiden.

Het profiel inclusief maatgevende glijcirkel is weergegeven in afbeelding 5.2. De stabiliteitsfactor voldoet ruim niet aan de eis van 0,9. Wanneer een taludverflauwing wordt toegevoegd (binnentalud verflauwd van 1:1 naar 1:2) voldoet het profiel ruim, zoals weergegeven in afbeelding 5.3. Bij falen zonder bezwijken kan dus een lagere kruinhoogte worden toegelaten (wat ook het aandrijvend gewicht verlaagd), maar vanwege de vernatting is mogelijk toch een taludverflauwing nodig. Of deze uitwisseling efficiënt is dient locatiespecifiek beschouwd te worden. Het verschil tussen kruin en binnendijs maaiveld is hier beperkt, waardoor een taludverflauwing relatief weinig invloed heeft op de breedte.

Afbeelding 5.2 Stabiliteitsfactor bij falen zonder bezwijken is 0,64



Afbeelding 5.3 Stabiliteitsfactor bij falen zonder bezwijken, inclusief kleine taludverflauwing van 1:1 naar 1:2 is 1,01



6 CONCLUSIES

Op basis van de voorliggende memo is geconcludeerd dat voor de faalmechanismehoogte, 2 vormen van falen kunnen worden beschouwd:

- falen met bezwijken (bres) falen met bezwijken is het bezwijken van het grondlichaam als gevolg van erosie van de kruin en/of het binnentalud, waarna bresvorming optreedt. De bresvorming leidt tot instroming en een overstrooming. Door de bres in de waterkering zal instroming blijven optreden, ook wanneer de buitenwaterstand daalt naar dagelijkse omstandigheden (na de storm);
- falen zonder bezwijken is het falen van de waterkering zonder bresvorming. De overslag/ overloop over de kruin leidt direct tot een overstrooming. Omdat er geen bres in de waterkering ontstaat zal instroming afnemen wanneer de buitenwaterstand daalt naar dagelijkse omstandigheden (na de storm). Falen zonder bezwijken kan in potentie over een grote lengte van de waterkering optreden, waardoor niet zonder meer kan worden gesteld dat de totale instroming lager is dan bij falen met bezwijken;
- de overstroomingsgevolgen van falen met bezwijken en falen zonder bezwijken verschillen. Verschillende overstroomingsgevolgen leiden tot verschillende toelaatbare faalkansen. Er wordt in dat geval mogelijk frequenter schade toegestaan, omdat de schade lager is;
- door de verschillende toelaatbare faalkansen kunnen verschillende kruinhoogten vereist zijn. Voor falen met bezwijken zal de laagste sterkte die kan worden toegewezen aan de bekleding op het binnentalud

leiden tot de maatgevende kruinhoogte. Voor falen zonder bezwijken dienen verschillende overslagdebieten te worden geëvalueerd om de maatgevende kruinhoogte te bepalen. Alle overslagdebieten kunnen immers voorkomen (met verschillende kansen) en leiden tot verschillende schade (met verschillende toelaatbare kansen);

- falen zonder bezwijken **op hoogte** kan leiden tot falen met bezwijken op **macrostabiliteit van het binnentalud** door vernatting van het grondlichaam. Indien een lagere kruinhoogte wordt toegestaan (omdat de schade als gevolg van falen zonder bezwijken op hoogte vaker wordt toegestaan) kan dit daarom leiden tot strengere eisen met betrekking tot de stabiliteit van het binnentalud. Een lagere kruin leidt dan tot een bredere dijk. Of deze uitwisseling efficiënt is dient locatiespecifiek te worden afgewogen, mogelijk kunnen hiermee knikpunten in de kosten worden voorkomen (zoals het openbreken van een weg op de kruin om deze op te hogen).

7 REFLECTIE OP ANALYSE

De volgende reflecties zijn opgenomen als onderdeel van dit memo:

- het berekenen van de schade als gevolg van falen met bezwijken en falen zonder bezwijken is goed toepasbaar voor verschillende gebieden. Indien de locatie van de instroming een grote invloed heeft (bijvoorbeeld door de aanwezigheid van verschillende kommen in het achterland, zie afbeelding 3.1) dient echter voor meerdere locaties in het gebied een berekening te worden gemaakt;
- voor de relatie tussen schade en toelaatbare kans van falen met bezwijken is momenteel de IPO-systematiek toepasbaar. De relatie tussen overstromingskans en investeringskosten voor falen zonder bezwijken is momenteel echter niet bekend. Indien falen zonder bezwijken in de toekomst separaat beschouwd gaat worden (zoals de aanpak in voorliggend memo) dan dient deze relatie onderzocht te worden in een economische optimalisatie (MKBA);
- de uitkomst van een dergelijke economische optimalisatie is naar verwachting gevoelig voor het verschil in versterkingskosten. De schade als gevolg van falen zonder bezwijken is mogelijk erg gevoelig voor een net iets hogere of lagere kruinhoogte, omdat dit leidt tot een sterk hoger of lager overloopdebiet. Zeker bij een begrensd boezempeil of een flauwe hazard curve is het denkbaar dat met beperkte extra investeringen de kans op overstroming door overloop/overslag zonder bezwijken ordes te verkleinen. Voor de kans op overstroming door bezwijken geldt dit niet/veel minder en zal toch bijvoorbeeld een steeds bredere berm nodig zijn om de kans te verkleinen.

8 REFERENTIES

- 1 Witteveen+Bos (2020), 128187-21-019.806 Onderzoek normering regionale kering.
- 2 STOWA (2015), Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen.
- 3 Rijkswaterstaat (2021), Schematiseringshandleiding hoogte kunstwerk.



Veiligheidsbenadering regionale waterkeringen: pilot “Regionale rivier – stedelijk”

9 februari 2024

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Verantwoording

Titel	Veiligheidsbenadering regionale waterkeringen: pilot regionale rivier - stedelijk
Opdrachtgever	STOWA
Projectleider	Henk van Hemert (STOWA)
Auteur(s)	Martijn Monden (lv-Infra), Dennis Wubben (lv-Infra) Barbara Bouman (TAUW), Nadine van dijk (TAUW)
Tweede lezer	Theo Feenstra (TAUW)
Projectnummer	1282372
Aantal pagina's	86
Datum	9 februari 2024
Handtekening	Ontbreekt in verband met digitale verwerking. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Colofon

TAUW bv
Rijnspoor 209
Postbus 6
2900 AA Capelle aan den IJssel
T +31 10 28 86 10 0
E info.rotterdam@tauw.com

Inhoud

1	Inleiding	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Doel	7
1.3	Disclaimer.....	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Beschrijving casus pilot	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Normering	9
2.3	Watersysteem en hydraulische randvoorwaarden	10
3	Schadeberekening.....	12
3.1	Inleiding	12
3.1.1	Relevante typen effecten/schade	12
3.1.2	Modellen voor het bepalen van effecten/schade	13
3.2	Schadeberekening pilot gebied	14
3.2.1	Werkwijze.....	14
3.2.2	Overstromingsberekening	14
3.2.3	Optredende schade en slachtoffers (SSM)	16
3.2.4	Vergelijking met Waterschadeschatter	19
3.2.5	Indirecte schade.....	21
3.2.6	Gevolgen buiten het beschouwde gebied	21
3.3	LIR en groepsrisico	22
3.3.1	Definitie LIR.....	22
3.3.2	Definitie groepsrisico.....	23
3.3.3	Normering van de waterkering	23
3.3.4	Werkwijze.....	24
3.3.5	Mortaliteit.....	25
3.3.6	LIR.....	27
3.3.7	Groepsrisico (indicatief)	27
3.4	Conclusies/discussie	28
4	(Water)systeemmaatregelen	31

4.1	Inleiding	31
4.1.1	Mogelijke watersysteemmaatregelen	31
4.1.2	Andere systeemmaatregelen	31
4.2	Effect van maatregelen op schade en slachtoffers	32
4.2.1	Scenario 3: Noordelijke bres, na 48 uur gedicht	32
4.2.2	Scenario 4: Noordelijke bres met afsluiting spoorviaduct	33
4.2.3	Scenario 5: Noordelijke bres met afsluiting spoorviaduct & na 48 uur bres dicht	33
4.2.4	Schade en slachtoffers	34
4.3	Haalbaarheid noodmaatregel	35
4.3.1	Snelheid vullen zandzakken	35
4.3.2	Vervoer zandzakken	36
4.3.3	Werkinstructies/calamiteitenoefeningen met aannemers	37
4.3.4	Beschikbare tijd om te handelen	37
4.3.5	Haalbaarheid noodmaatregel 'nooddammen'	39
4.4	Conclusies/discussie	41
5	Maatschappelijke kosten baten analyse	43
5.1	Methode	43
5.2	Waterstanden	44
5.3	Kosten dijkversterking	46
5.3.1	Aangehouden dijkprofielen	46
5.3.2	Aangehouden profiel nieuwe kanteldijk	47
5.3.3	Kosten	47
5.4	Overstromingsrisico	53
5.5	Optimale ontwerpnorm	56
5.6	Optimale toetsnorm	60
5.7	Conclusies/discussie	61
6	Maatgevende eisen medegebruik	62
7	Relatie tussen overstromingskans en eisen aan de waterkering	64
7.1	Inleiding	64
7.2	Beschikbare informatie	64
7.3	Probabilistische toetsmethode	66
7.3.1	Beschouwde faalmechanismen	66

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

7.3.2	Hoogte (HT)	67
7.3.3	Macrostablieit binnenwaarts (STBI)	67
7.3.4	Piping (STPH)	73
7.3.5	Beoordeling en duiding resultaten	76
7.4	Basisfaalkansen en likelihood methode	81
7.4.1	Opzetten fragility curves van basisfaalkansen	81
7.4.2	Combineren fragility curves met waterstandstatistiek	82
7.5	Conclusies, discussie en aanbevelingen	83
8	Bibliografie	86

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Nederlandse waterkeringsysteem bestaat onder andere uit primaire, regionale en overige keringen. Voor de primaire waterkeringen is recent (2017) overgestapt van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering per dijktraject. Voor regionale keringen wordt momenteel uitgegaan van een overschrijdingskansbenadering. Voor de regionale keringen is verkend op welke wijze de vigerende veiligheidsbenadering kan worden aangepast. Op basis van die verkenning is geconcludeerd dat een regionale benadering wenselijk is, die recht doet aan de verscheidenheid aan regionale keringen en de regionale watersystemen. Ten behoeve van de invulling van de specifieke regionale benadering zijn vier pilots uitgevoerd, waarin een top 4 met denkbare aanpassingen zijn uitgetoetst. Voor een goed landelijk beeld zijn hiervoor 2 typen regionale keringen beschouwd, en 2 typen beschermde gebieden. Aldus resulteren 4 pilots, te weten:

- Boezemkade – landelijk: een kade langs een boezem die een landelijk gebied beschermd;
- Boezemkade – stedelijk: een kade langs een boezem die een stedelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – landelijk: een kering langs een regionale rivier die een landelijk gebied beschermd;
- Regionale rivier – stedelijk: een kering langs een regionale rivier die een stedelijk gebied beschermd.

Onderzoeksvragen

Het doel van de pilots is bij te dragen aan de besluitvorming over de aanpassing van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. Daartoe zijn de volgende denkbare aanpassingen onderzocht:

- normeren:
 - o uniforme beschouwing van de gevolgen van een overstroming, zowel binnen als buiten het overstroomde gebied;
 - o rekening houden met maatregelen in het watersysteem of het overstroomde gebied, die de gevolgen van een overstroming kunnen beperken;
 - o medegebruik: kan medegebruik maatgevende eisen stellen aan de kering die moeten worden meegewogen bij de normstelling van de kering uit oogpunt waterveiligheid;
 - o de vertaling van de berekende gevolgen in een norm, op basis van een acceptabel overstromingsrisico (mede op basis van kosten-baten analyses);
- toetsen:
 - o werkwijzen voor de toetsing.

Afhankelijk van de aard van de pilot zijn binnen de uitwerking de accenten op verschillende onderdelen gelegd. Zo is in één pilot veel aandacht besteed aan het rekening houden met slachtoffers, terwijl in een andere bijvoorbeeld de meerwaarde van een gedifferentieerde (per faalmechanisme) normering. Ook zijn de wijzen waarop is geverifieerd op de sterkte van de kering aan de norm voldoet op verschillende wijzen uitgewerkt, teneinde de bruikbaarheid van enkele

(internationale) werkwijzen voor zo'n verificatie te verkennen. Hoewel de pilots dus generiek van opzet zijn, verschillen het detailniveau waarin de onderzoeksvragen zijn uitgewerkt.

Dit rapport betreft de uitwerking van de pilot voor een stedelijk gebied langs een regionale rivier. De pilot is geïnspireerd op het gebied aan de rechterzijde van de regionale rivier de Dieze nabij Den Bosch. De keringbeheerder is Waterschap Aa & Maas en de pilot is uitgewerkt door TAUW en IV-Infra.

1.2 Doel

In dit rapport worden de volgende onderwerpen/onderzoeksvragen uitgewerkt:

1. **Schadeberekening.** Onderzocht is hoe groot de schade en het aantal slachtoffers zijn die op kunnen treden als gevolg van een overstroming van het pilotgebied, hierbij rekening houdend met indirecte effecten. Deze gegevens worden vergeleken met de normen resulterend uit de vigerende aanpak. Tevens wordt onderzocht of in plaats van de materiële schade het lokaal individueel risico (LIR) of groepsrisico maatgevend zouden kunnen zijn voor de normering van de kering.
2. **(Water)systeemmaatregelen.** Hierbij is onderzocht of en op welke wijze de gevolgen van een overstroming kunnen worden beperkt door het nemen van maatregelen tijdens dreigende hoogwatersituaties of bij doorbraak van de kering. Ook preventieve maatregelen worden hierbij beschouwd.
3. **Maatschappelijke kosten baten analyse** In dit onderdeel is onderzocht bij welk risiconiveau de contante waarde van de investeringskosten en het risico minimaal zijn.
4. **Maatgevende eisen medegebruik.** Onderzoeksvraag: welke eisen stelt het medegebruik van de waterkering (zoals functies als verkeersweg of als traject voor kabels en leidingen) aan met name de stabiliteit/vervorming van een waterkering, en in welke situaties kunnen deze eisen maatgevend zijn?
5. **Relatie tussen overstromingskansen en eisen aan de waterkering.** Onderzocht is op welke wijze kan worden beoordeeld of de sterkte van de kering voldoet aan de genormeerde overstromingskansen voor een gebied, en op welke wijze deze kan worden vertaald in eisen aan de kering.

1.3 Disclaimer

Voor de uitwerking van de pilots is gebruik gemaakt van werkelijke dijkvakken en beschermd gebieden. Het doel van de pilots is de toegevoegde waarde, de haalbaarheid en de consequentie van verschillende aanpassingen van de toets- en normeringsmethodes te onderzoeken. Het verkrijgen van een gedetailleerd en accuraat beeld van de actuele waterveiligheid in de pilotgebieden was nadrukkelijk niet het doel. Uit oogpunt van doelmatigheid van de uitwerking zijn uitgangspunten soms vereenvoudigd of zijn (soms grove) aannamen gedaan, daar waar dat acceptabel was uit oogpunt van de doelstelling van de pilots. Daarmee hebben de resultaten zoals de optimale normen en het aangetoonde veiligheidsniveau geen betekenis voor de beschouwde pilotgebied. Benadrukt wordt daarom dat geen van de conclusies uit dit rapport gebruikt kunnen worden om conclusies aan te verbinden over de Rechter Diezedijk en het beschermd gebied beschouwde pilotgebieden.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de casus van deze pilot toegelicht, waarbij wordt ingegaan op o.a. de ligging van de kering, de normering en het watersysteem. In de hoofdstukken 3 tot en met 7 worden achtereenvolgens de hierboven beschreven onderzoeksvragen behandeld.

2 Beschrijving casus pilot

2.1 Inleiding

Het pilotgebied wordt beschermd door een regionale waterkering in beheer van Waterschap Aa en Maas, gelegen langs de regionale rivier de Dieze nabij Den Bosch. De ligging van de kering is in blauw weergegeven in Figuur 2-1. Links is een luchtfoto weergegeven, waarop te zien is dat het gebied direct achter de kering grotendeels onbebouwd is, op enkele woningen en een grote rioolwaterzuiveringsinstallaties na. Het achterliggende gebied wordt doorsneden door de snelweg A59. Haaks hierop ligt een spoorwegverbinding, die het gebied scheidt van de achterliggende woonwijken van Den Bosch. Rechts in Figuur 2-1 is de hoogteligging van het gebied o.b.v. AHN3 weergegeven, waarin te zien is dat het maaiveld op een hoogte van ca. NAP +2 m ligt. Verder valt op dat de spoorlijn hooggelegen is, waardoor deze een barrière vormt bij een eventuele overstroming. De onderdoorgang van de A59 onder het spoor vormt echter een opening in deze barrière, waardoor het water wel de woonwijken in het achterland zou kunnen bereiken.



Figuur 2-1: Ligging dijk van het pilotgebied in blauw, met links een luchtfoto en rechts de hoogteligging o.b.v. AHN3

2.2 Normering

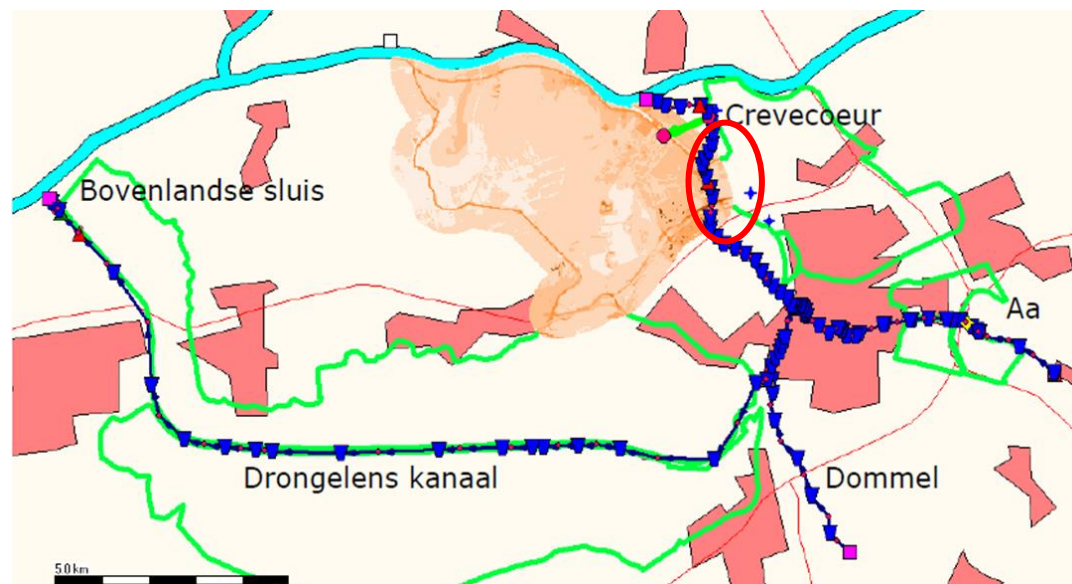
De waterkering kent een (overschrijdingskans)norm van 1/150 per jaar, hierbij geldt een toetspeil van NAP +5,05 m (HKV, december 2013). Deze normering is in 2010 vastgesteld door de Gedeputeerde Staten van Noord-Brabant. Op basis van een bestuurlijke keuze is hierbij voor de

gehele provincie een norm van 1/100 per jaar aangehouden. Voor het stedelijke gebied rond Den Bosch is dit verhoogd naar 1/150 per jaar, gezien de economische waarde van dit gebied.

2.3 Watersysteem en hydraulische randvoorwaarden

Hoge waterstanden in 's-Hertogenbosch treden op als gevolg van relatief hoge afvoeren van de Aa en de Dommel in combinatie met hoge waterstanden op de Maas. Als uitgangspunt voor de hoogwaterberekeningen is gesteld dat de kans op samenvallen van afvoergolven op de Maas en afvoergolven op de Aa en de Dommel 0,8 [-] is, met een vertraging van de Maaspijk met 55 uur ten opzichte van de Aa en de Dommel. Hieruit is afgeleid dat een 1/125 jaar afvoergolf op de Maas in combinatie met 1/100 jaar afvoer van de Aa en de Dommel leidt tot een 1/150 jaar gebeurtenis in 's-Hertogenbosch (HKV, december 2013). Ter plaatse van het pilotgebied leidt dit tot een toetspeil van NAP +5,05 m.

De sturing van de kunstwerken Crevecoeur in de Dieze en de Bovenlandse Sluis in het Drongelens kanaal bepalen mede de waterstand in Den Bosch. Spuisluis Crevecoeur is een uitwateringskunstwerk die stuurt op een bovenstroomse waterstand van NAP+4,9 m bij hoogwater. Onder de bepaalde condities kan de spuisluis fungeren als onderspuier. De Bovenlandse Sluis is een uitwateringskunstwerk met een maximaal debiet van 100 m³/s, waar ook geen terugstroming vanuit de Maas mogelijk is.



Figuur 2-2: Watersysteem rondom de Dieze, met rood omcirkeld de locatie van het pilotgebied

Het waterschap Aa en Maas heeft regionale keringen die gelegen zijn in het zogeheten HOWABO-gebied, langs de Aa, de Dieze en het Drongelens kanaal. De afvoer van de Maas is sterk bepalend voor de optredende waterstanden in 's-Hertogenbosch en meer bovenstrooms op de Aa en de Dommel. Het al dan niet dan niet samenvallen van de afvoergolven van de Maas en de Aa/Dommel is hierin belangrijk. In de uitgevoerde hoogwaterstudie is uitgegaan van een vaste

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

vorm en looptijd van de Maasafvoer en een bepaalde kans op samenvallen van de afvoergolven, met een vaste vertraging ten opzichte van de Aa en de Dommel (HKV, december 2013).

Het model waarmee de hydraulische randvoorwaarden zijn berekend was niet inzetbaar voor deze pilot, waardoor het niet mogelijk was om waterpeilen bij andere terugkeertijden te bepalen. Hiervoor is daarom gebruik gemaakt van gemeten waterstanden, die zijn geëxtrapoleerd. Hier wordt nader op ingegaan in paragraaf 5.2.

3 Schadeberekening

3.1 Inleiding

Binnen de huidige normeringsmethode wordt bestuurlijk een norm gekozen op basis van de berekende schade in het overstroomde gebied (in klassen, gebaseerd op een geaccepteerd kans op een schade van ca. 0,1 miljoen Euro/jaar), maar daarbij nadrukkelijk rekening houdend met overige consequenties van een overstroming (zoals het functioneren van het boezemsysteem, stremming scheepvaart). Dergelijke overige consequenties zijn echter niet gespecificeerd.

Vanwege de vaak beperkte omvang van overstromingen vanuit het regionale watersysteem kunnen de bovenregionale effecten en indirecte schaden relatief groot zijn ten opzichte van de berekende (directe) schade in het overstroomde gebied zelf. Bovendien is gebleken (verkenning LIR, opmerkingen werkgroep) dat in een enkele gevallen slachtoffers denkbaar zijn en/of grote aantallen mensen kunnen worden getroffen door een (regionale) overstroming.

Een aangedragen verbetering van de veiligheidsbenadering betreft het consequent beschouwen van alle gevolgen van een overstroming, zoals bovenregionale effecten, indirecte schaden, schade door stremming scheepvaart en water aan- en afvoer, het aantal getroffen en eventueel zelfs slachtoffers, etc.

Ten hoeve van de besluitvorming over de te beschouwen gevolgen worden in dit hoofdstuk de volgende vragen beantwoord:

- Welke directe en indirecte effecten en/of schaden zijn relevant? (§3.1.1)
- Hoe kunnen deze effecten worden gekwantificeerd? (§3.1.2)
- Welke schade en hoeveel slachtoffers kunnen er optreden/vallen als gevolg van een overstroming van het pilotgebied na een doorbraak in het dijkvak? (§3.2.3)
- Kan in plaats van de optredende schade ook het lokaal individueel risico (LIR) of het groepsrisico maatgevend zijn voor de normering van het dijkvak? (§3.3.6)

Het hoofdstuk wordt afgesloten met een samenvatting van de bevindingen en enkele conclusies in §3.4.

3.1.1 Relevante typen effecten/schade

De verschillende typen gevolgen die kunnen optreden als gevolg van een overstroming worden hieronder toegelicht.

Directe schade (binnen het beschouwde gebied)

Onder directe schade wordt schade verstaan die binnen het overstroomde gebied optreedt als gevolg van het water. In de koploperpilot (HKV, juni 2021) zijn de volgende typen schade geïdentificeerd:

- Schade aan woningen (zowel inboedel als opstal)
- Schade aan infrastructuur
- Schade aan overige categorieën (landbouw, glastuinbouw, recreatie, vliegvelden)

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

- Schade aan kwetsbare objecten (ziekenhuizen, zorginstellingen, scholen, rijksmonumenten, cultureel erfgoed, risicolocaties voor milieu etc.)

Daarnaast kan worden gedacht aan schade aan kwetsbare natuur of ecologie, en het verdrinken van vee of andere dieren.

Indirecte schade (binnen het beschouwde gebied)

Onder indirecte schade worden secundaire gevolgen van een overstroming geschaard, bijvoorbeeld door bedrijfsuitval. In de koploperpilot (HKV, juni 2021) zijn de volgende typen indirecte schade geïdentificeerd:

- Schade door uitval infrastructuur
- Schade door bedrijfsuitval
- Schade veroorzaakt door uitval overige categorieën (landbouw, glastuinbouw, recreatie, vliegvelden)
- Schade door uitval kwetsbare objecten (zoals ziekenhuizen)
- Schade aan kwetsbare natuur/ecologie (denk aan beken, of dode vissen, insecten etc.)

Schade buiten het beschouwde gebied

Ook is het mogelijk dat door het optreden van een overstroming elders schade optreedt, bijvoorbeeld aan kademuuren door het dalen van de waterstand op het buitenwater.

Slachtoffers

Slachtoffers zijn personen die komen te overlijden als gevolg van de overstroming. Slachtoffers zijn altijd een direct gevolg, er is geen indirecte component. Bij regionale waterkeringen is de algemene aanname dat weinig tot geen slachtoffers vallen vanwege de geringe waterdiepte, en lage stroom- en stijgsnelheid.

Getroffenen

Getroffenen zijn personen in het overstroomde gebied die hinder ondervinden van een overstroming van een regionale kering. Dit kan zowel direct zijn (in de vorm van 'natte voeten'), als indirect (personen die hinder ondervinden van uitval van bedrijven, kwetsbare objecten en vitale infrastructuur). Het aantal getroffenen kan worden bepaald op basis van de overstromingsberekeningen, en zijn de personen die woonachtig of werkzaam zijn in het overstroomde gebied.

3.1.2 Modellen voor het bepalen van effecten/schade

Voor het bepalen van de mogelijke gevolgen van een doorbraak van een regionale kering zijn 2 modellen beschikbaar: De WaterSchadeSchatter en de Schade- en Slachtoffer Module (SSM2017). Met de eerste wordt enkel de (directe) schade binnen het beschouwde gebied berekend, de tweede berekent daarnaast het aantal getroffenen en het aantal dodelijke slachtoffers. Beiden houden geen rekening met indirecte schade binnen het gebied en met

schade buiten het gebied. Ook wordt geen rekening gehouden met schade aan (kwetsbare) natuur of ecologie of het overlijden van dieren.

3.2 Schadeberekening pilot gebied

3.2.1 Werkwijze

Om de optredende schade te bepalen wordt eerst een overstromingsberekening uitgevoerd. De resultaten van deze berekening worden vervolgens gebruikt als input voor de berekening van schade en slachtoffers. Hierbij wordt een vergelijk gemaakt tussen SSM2017 en de Waterschadeschatter. Vervolgens wordt voor de typen schade die niet met deze software worden berekend een inschatting gemaakt.

3.2.2 Overstromingsberekening

In opdracht van Waterschap Aa en Maas zijn in 2013 door HKV overstromingsberekeningen uitgevoerd ten behoeve van een studie naar de gevolgen van een overstroming (HKV, december 2013). In het programma SOBEK is een overstromingsmodel opgesteld aan de hand van dynamische aanvoer van de Dommel en Aa en waterstanden op de Maas. Op basis van dit dynamische model worden (uitgaande van een bres) de waterdieptes, stroomsnelheid, aankomsttijd en stijgsnelheid bepaald (zie figuur 3-1).



Figuur 3-1: Stroomschema invoer-uitvoer SOBEK berekening,

Voor deze pilot zijn nieuwe overstromingsberekeningen gemaakt, waarbij gebruik is gemaakt van de bestaande inputbestanden. Voor deze berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd;

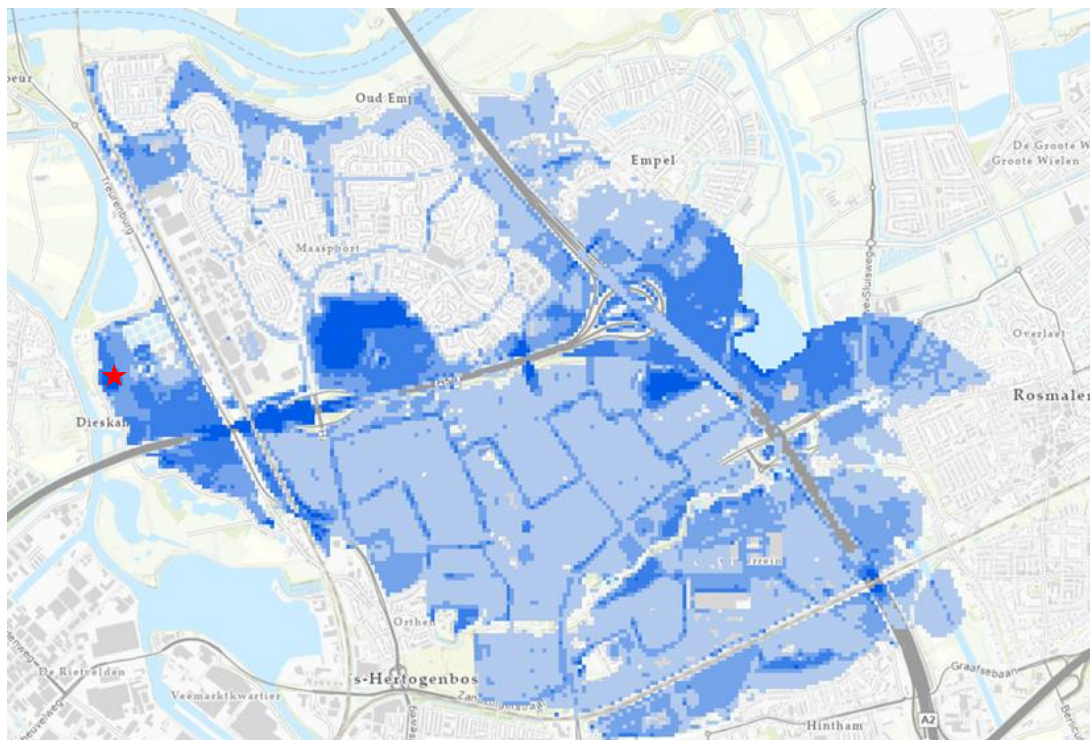
- Maatgevende waterstand bij T=150 is NAP +5,05 m.
- De maatgevende afvoer is berekend aan de hand van dynamische aanvoer van de Dommel en Aa aan de hand van een bestaand model (HOWABO-model).
- Bresgroei: berekend met Verheij en de Knaap 2002, met hoogtekering, kritieke stroomsnelheid en hydraulische belasting.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

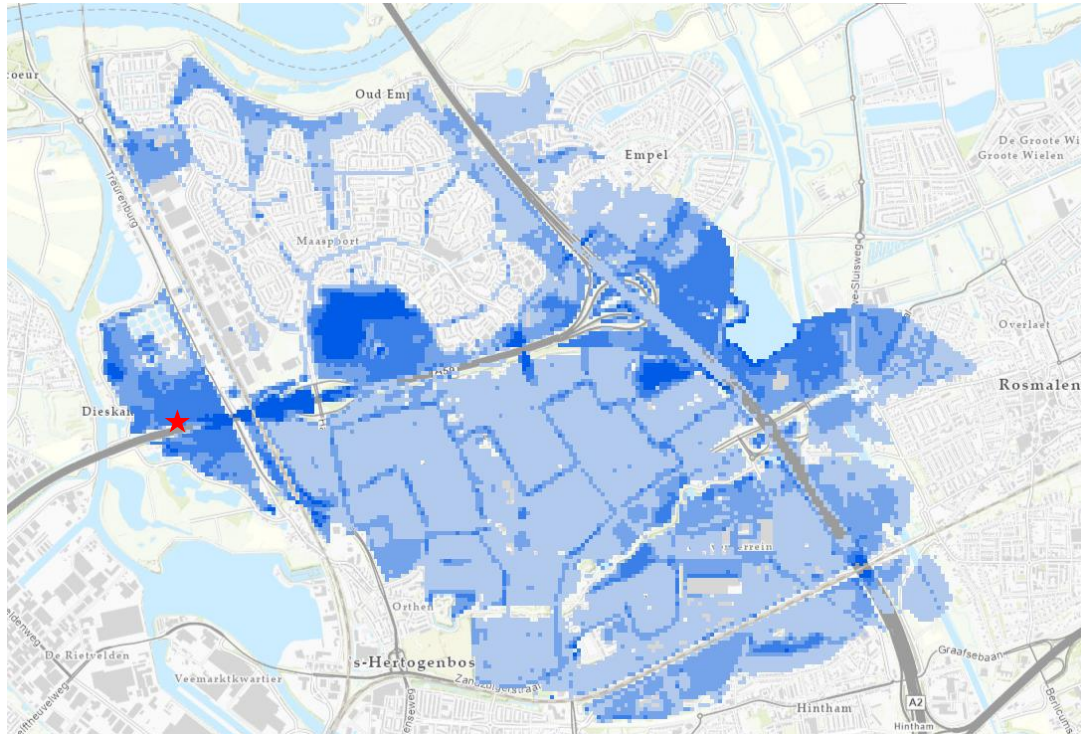
Op basis van dit basismodel zijn verschillende scenario's doorgerekend. Zo is onderzocht hoe de overstroming verloopt wanneer op een andere plek zich een bres vormt. Daarnaast is een aantal scenario's beschouwd waarin (nood)-maatregelen worden getroffen, deze worden toegelicht in hoofdstuk 4.

Allereerst is gekeken of een bres aan de noordzijde van de A59 (scenario 1, gelijk aan de overstromingsberekeningen uit 2013) tot een andere overstroming leidt ten opzichte van een bres aan de zuidzijde van de A59 (scenario 2). De reden hiervoor is dat de A59 als een barrière tussen het noordelijke en zuidelijke gebied lijkt te functioneren.

De resultaten van de overstromingsberekeningen zijn weergegeven figuur 3-2 en figuur 3-3. Te zien is dat er nauwelijks verschil in overstromingsverloop is wanneer er een doorbraak aan de noord of aan de zuidzijde van de A59 optreedt. Beide kaarten tonen dat het water na doorbraak door het viaduct van de A59 onder het spoor door naar het achtergelegen woongebied en bedrijventerrein stroomt. Te zien is dat het noordelijke gebied iets hoger ligt, waardoor de grootste overstroming optreedt in het zuidoostelijke gebied.



Figuur 3-2: Scenario 1, waterdiepte als gevolg van bres aan noordzijde (rode ster)



Figuur 3-3: Scenario 2: waterdiepte als gevolg van bres aan zuidzijde (rode ster)

3.2.3 Optredende schade en slachtoffers (SSM)

Uit de SOBEK-berekeningen volgt een rasterdataset met berekende maximale waterdieptes. Deze vormt de basis voor de schadeberekeningen. De stroomsnelheid en stijgsnelheid zijn van belang om de slachtofferaantallen te kunnen bepalen.

Er zijn 2 verschillende modellen vrij beschikbaar voor het uitvoeren van schade en slachtofferberekeningen, namelijk de schade en slachtoffermodule (SSM2017) van Deltares en de waterschadeschatter (WSS) van STOWA. In deze pilot wordt gerekend met SSM2017, omdat hiermee in tegenstelling tot WSS ook aantallen slachtoffers kunnen worden bepaald. Een korte beschouwing van de verschillen tussen de 2 modellen is gegeven in paragraaf 3.2.4.

In tabel 3-1 is de schade, het aantal slachtoffers en aantal getroffen en geïmponeerd op de weg na een overstroming bij een bres aan de noordzijde (scenario 1) en een bres aan de zuidzijde (scenario 2).

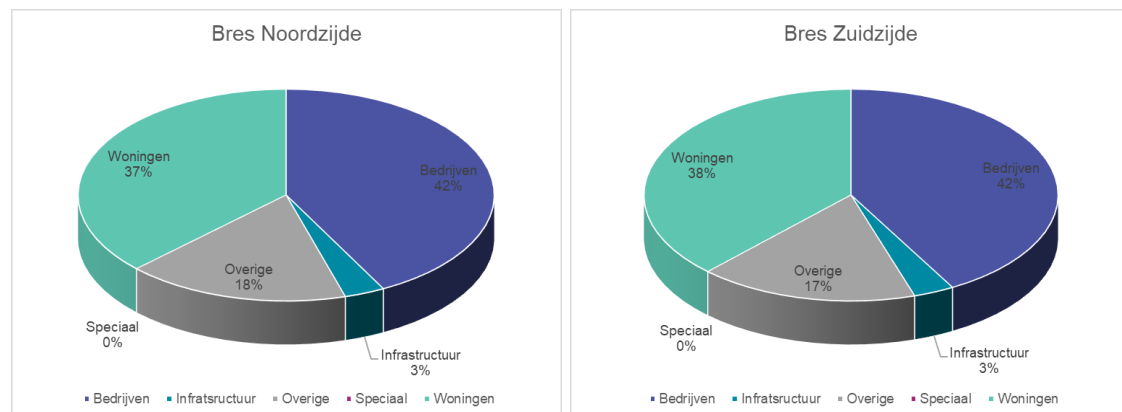
Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Tabel 3-1: Schade, aantal slachtoffers en getroffen na een overstroming

Scenario	Beschrijving	Schade (in Euro's)	Aantal slachtoffers zonder evacuatie	Aantal getroffenen
Scenario 1	Bres aan noordzijde	820.000.000	36	20850
Scenario 2	Bres aan zuidzijde	800.000.000	35	20430

Uit tabel 3-1 volgt dat de schade die is berekend en het aantal slachtoffers en getroffen nauwelijks van elkaar verschillen voor de verschillende breslocaties. Dit komt overeen met het beeld dat volgt uit de overstromingsbeelden (paragraaf 3.2.2). De schadeberekeningen bevestigen dat het traject met het oog op overstromingsgevolgen niet opgeknipt hoeft te worden.

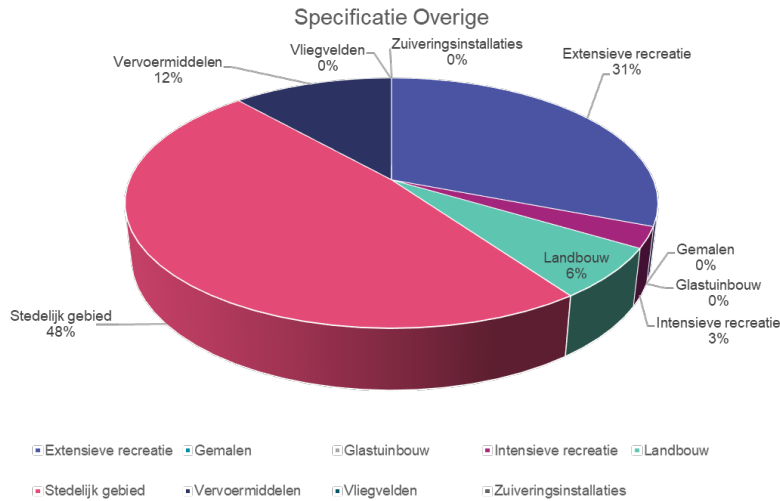
Het schadebedrag en de aantallen zijn onder andere te verklaren doordat het achterliggende gebied een stedelijk gebied betreft. Het merendeel van de schade bestaat uit eengezinswoningen en bedrijven (zie figuur 3-4).



Figuur 3-4: Soort schade, links scenario 1, rechts scenario 2.

Het overige deel van de schade bestaat grotendeels uit stedelijk gebied (bebouwd gebied, bouwterrein) en extensieve recreatie (bos, park en plantsoen, sportterrein). Opvallend is dat geen schade aan de rioolwaterzuiveringsinstallatie direct achter de kering wordt meegenomen. Uit figuur 3-2 en figuur 3-3 blijkt dat het gebied waar de zuivering is gelegen niet overstromd raakt, hier ligt het maaiveld grotendeels hoger dan het omliggende maaiveld. In werkelijkheid zal vermoedelijk wel enige schade optreden, omdat een deel van het terrein wel lager ligt en omdat productieprocessen verstoord kunnen raken.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02



Figuur 3-5: Specificatie 'Overige schade'.

Volgens de SSM berekening worden ca. 20.000 mensen getroffen door een overstroming, en vallen 36 dodelijke slachtoffers. Hierbij wordt opgemerkt dat voor regionale keringen gerekend wordt met een evacuatiefractie van 0, wat betekent dat voorafgaand aan de overstroming geen mensen uit het gebied worden geëvacueerd.

Om een beter beeld te krijgen van waar in het gebied de schade en slachtoffers optreden/vallen, is in figuur 3-6 en tabel 3-2 een onderverdeling van het gebied gemaakt. Door de resultaten uit de SSM berekening uit te splitsen naar deze 4 deelgebieden kan bepaald worden waar de meeste schade en slachtoffers ten gevolge van de overstroming optreden.



Figuur 3-6: Onderverdeling gebied in deelgebieden

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Tabel 3-2: Schade, aantal slachtoffers en getroffen en na een overstroming onderverdeeld in 4 gebieden

Gebied	Schade [€]	Slachtoffers [-]	Aantal Getroffenen [-]
Noordwest	3.030.649	0	3
Zuidwest	1.938.738	0	6
Noordoost	119.127.955	5	5512
Zuidoost	699.599.884	31	15330

Tabel 3-2 toont dat het zuidoosten veruit de meeste schade ondervindt. Dit kan verklaard worden door het feit dat dit gebied lager ligt dan de andere gebieden, en daarnaast dichtbebouwd is.

3.2.4 Vergelijking met Waterschadeschatter

Ter vergelijking is naast de berekeningen met SSM2017 ook een schadeberekening met de Waterschadeschatter gemaakt. Hiervoor zijn de volgende invoerparameters gebruikt:

Schadetabel

standaard

AHN versie

AHN3

Duur overlast

240 uur

Hersteltijd wegen

10 dag(en)

Hersteltijd bebouwing

10 dag(en)

Maand gebeurtenis

februari

Deze parameters zijn zo ongunstig mogelijk gekozen, zodat een bovengrens van de schade wordt verkregen. De resultaten van de berekening zijn weergegeven in Tabel 3-3. Ter vergelijking zijn in Tabel 3-4 nogmaals de samengevatte resultaten uit SSM2017 weergegeven.

Tabel 3-3: Berekende schade met de Waterschadeschatter van STOWA voor scenario 1

Categorie	Oppervlakte met schade	Schade
woonfunctie	55,8 ha	€ 209.033.992,-
industriefunctie	19,4 ha	€ 217.609.532,-
kantoorfunctie	13,2 ha	€ 150.197.140,-
winkelfunctie	6,1 ha	€ 69.789.981,-
kas	0,1 ha	€ 48.130,-
logiesfunctie	0,2 ha	€ 2.605.474,-
bijeenkomstfunctie	1,2 ha	€ 4.392.357,-

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Categorie	Oppervlakte met schade	Schade
sportfunctie	2,6 ha	€ 4.259.131,-
onderwijsfunctie	3,8 ha	€ 43.485.222,-
gezondheidszorgfunctie	2,7 ha	€ 30.947.636,-
woongebied	128,5 ha	€ 96.680,-
bedrijventerrein	57,2 ha	€ 43.055,-
dagrecreatief terrein	2,6 ha	€ 2.810,-
sportterrein	1,2 ha	€ 935,-
volkstuinten	3,9 ha	€ 1.262,-
snelweg	23,4 ha	€ 181.964.255,-
regionale_weg	0,7 ha	€ 734.410,-
verkeerseiland	0,3 ha	€ 8.110.092,-
lokale_weg	91,6 ha	€ 69.168,-
overige wegdelen	100,2 ha	€ 75.759,-
spoor	0,0 ha	€ 29.858.087,-
agrarisch_gras_en_veevoeders	30,2 ha	€ 6.408,-
akkerbouw	0,0 ha	€ 0,-
boom_en_heesterkweek	0,3 ha	€ 10.887,-
fruitteelt	0,2 ha	€ 5.334,-
kerstbomen	0,9 ha	€ 31.465,-
mais_snij	26,9 ha	€ 5.624,-
suikerbieten	4,5 ha	€ 2.001,-
weidehooi	56,5 ha	€ 12.008,-
Voetpad	1,7 ha	€ 1.291,-
Fietspad	13,3 ha	€ 10.102,-
Totaal	649,4 ha	€ 953.410.228,-

Tabel 3-4: Resultaten schadeberekening SSM2017 voor scenario 1

Categorie	Schade [euro]
Bedrijven	€ 347.200.000
Infrastructuur	€ 25.800.000
Overige	€ 142.340.000
Speciaal	€ 0
Woningen	€ 306.000.000
Totaal	€ 821.340.000,00

Te zien is dat de berekende schade met de Waterschadeschatter (WSS) hoger is dan die met SSM2017, maar dat beide bedragen in dezelfde orde van grootte liggen.¹ Wanneer in meer detail naar de resultaten van WSS wordt gekeken, valt op dat de hogere schade voornamelijk wordt veroorzaakt door de berekende schade aan de infrastructuur: SSM berekent hiervoor ca. 26 miljoen euro, in WSS wordt enkel aan de snelweg al 182 miljoen euro aan schade berekend. Dit heeft mogelijk te maken met de conservatief ingeschatte hersteltijd van 10 dagen.

3.2.5 Indirecte schade

Wanneer wordt gekeken naar de indirecte schade die optreedt als gevolg van een overstroming, zal dit met name veroorzaakt worden door het uitvallen van de infrastructuur van de A59 en door bedrijfsuitval.

Voor de schade als gevolg van het uitvallen van de A59 wordt een inschatting gegeven door de Waterschadeschatter (zie paragraaf 3.2.4). Daar is als bovengrens uitgegaan van een hersteltijd van 10 dagen, in werkelijkheid zal dit vermoedelijk enkele dagen zijn. De indirecte schade zal daarom in de orde van enkele tientallen miljoenen euro's liggen.

Op het bedrijvenpark ten oosten van de spoorlijn en ten noorden van de A59 bevinden zich enkele logistieke bedrijven zoals DHL. Ten zuiden van de A59 ligt het High Tech Park 's-Hertogenbosch, met diverse grote en kleine bedrijven, alsmede bankkantoren. Aangenomen wordt dat bij een overstroming al deze bedrijven voor een periode van enkele dagen tot meerdere weken stil komen te liggen. Hoewel het zonder een uitvoerige studie moeilijk is om de gevolgen hiervan te berekenen wordt ingeschat dat de indirecte economische schade als gevolg hiervan ook in de orde van de vele miljoenen euro's ligt.

Daarnaast is het waarschijnlijk dat, hoewel deze zoals toegelicht in paragraaf 3.2.3 niet overstroomt, de rioolwaterzuiveringsinstallatie wel indirecte hinder zal ondervinden van een overstroming, bijvoorbeeld omdat hij niet meer te bereiken is voor het personeel. Ook dit zal significante schade veroorzaken.

Uit de publieke informatie (PDOK) blijken verder geen belangrijke kwetsbare objecten zoals ziekenhuizen geraakt te worden. Ook worden geen kwetsbare natuurgebieden getroffen (er zijn geen Natura2000 gebieden in de nabije omgeving) en zijn er geen grote veebedrijven in het getroffen gebied. De indirecte schade wordt voor deze categorieën daarom als beperkt ingeschat.

3.2.6 Gevolgen buiten het beschouwde gebied

Bij gevolgen van overstroming buiten het beschouwde gebied wordt vooral gedacht aan gevolgen van het dalen van de waterstand als gevolg van het leeglopen van een watersysteem. Dit is met name relevant voor boezemsystemen, wat vaak afgesloten systemen zijn die een beperkt volume water bevatten. Wanneer één polder overstroomt als gevolg van bresvorming kan dit ertoe leiden dat de boezem leegloopt, waardoor schade kan ontstaan aan bv. vaartuigen, aan het water

¹.

gelegen woningen of waterkeringen van andere polders binnen hetzelfde watersysteem. In het geval van extreem lage waterstanden langs de Dieze zou dit mogelijk schade kunnen opleveren aan de historische kademuren in het centrum van Den Bosch.

De Dieze is een regionale rivier die gevoed wordt door de Dommel en de Aa en in verbinding staat met de Zuid-Willemsvaart. Deze systemen hebben gezamenlijk een lengte van tientallen kilometers en bevatten een grote hoeveelheid water. Het wordt daarom niet waarschijnlijk geacht dat dit systeem 'leegloopt'. Wel kan de waterstand dalen ten gevolge van een bres, maar aangezien bresvorming plaatsvindt bij een maatgevend hoge waterstand zal dit niet leiden tot een extreem lage waterstand, maar eerder een terugval naar de gemiddelde waterstand. Daarom wordt ingeschat dat de kans op significante schade buiten het beschouwde gebied bij een overstroming minimaal is.

3.3 LIR en groepsrisico

Normaliter is de normering van een regionale waterkering gebaseerd op de mogelijke schade, en wordt niet gekeken naar slachtoffers. Gezien het grote aantal berekende dodelijke slachtoffers in het beschermde gebied rees echter de vraag of hier het lokaal individueel risico (LIR) of het groepsrisico maatgevend zouden kunnen zijn. In deze paragraaf wordt deze vraag uitgewerkt.

3.3.1 Definitie LIR

Het LIR (Lokaal Individueel Risico) is gedefinieerd als de kans per jaar voor een fictief persoon aanwezig op een bepaalde locatie om te overlijden als gevolg van een overstroming, daarbij rekening houdend met de mogelijkheid van preventieve evacuatie (Deltares, september 2009). Het LIR is dus niet afhankelijk van de bevolkingsdichtheid. In Nederland is vastgesteld dat het LIR maximaal 1/100.000 (1E-5) per jaar mag zijn.

Het LIR kan als volgt worden berekend:

$$LIR = P_1 * P_2 * P_3$$

Met:

LIR = de kans op overlijden van een individu als gevolg van een overstroming	[1/jaar]
P ₁ = de kans op een overstroming op een bepaalde locatie	[1/jaar]
P ₂ = de 'mortaliteit'	[-]
P ₃ = de kans op aanwezigheid van een individu op een bepaalde locatie	[-]

De mortaliteit wordt gedefinieerd als de kans dat een individu overlijdt wanneer hij zich tijdens een overstroming op een bepaalde locatie bevindt.

Om te bepalen wat de maximaal toelaatbare overstromingskans is om te voldoen aan de LIR-eis van 1/100.000 per jaar kan de hierboven beschreven formule als volgt worden uitgedrukt:

$$P_{1,min} = LIR / (P_2 \times P_3)$$

3.3.2 Definitie groepsrisico

Vanuit maatschappelijk perspectief dient naast het individueel risico ook het groepsrisico te worden beschouwd. In gebieden waar veel mensen wonen of waar een groot gebied in één keer kan onderstromen, kunnen veel slachtoffers vallen. Eén overstroming met een groot aantal slachtoffers heeft namelijk een grotere maatschappelijke impact dan meerdere kleine(re) incidenten.

Als criterium voor het groepsrisico op nationaal niveau is door Vrijling (1985) het onderstaande voorgesteld. Dit criterium geldt voor een beoordeling van het totale groepsrisico voor alle vergelijkbare technische systemen (zoals tankstations, luchthavens maar ook polders) tezamen in Nederland. Om dit criterium bij een individuele polder toe te kunnen passen, is dus nog een vertaalslag nodig (Vrijling, 1985)

$$1-F(N) = [(\beta * 100 / k)^2] / N^2$$

Met:

F(N) = Onderschrijdingskans van N slachtoffers

β = beleidsfactor [-]

k = risico-aversie index [-]

N = aantal slachtoffers [-]

Conform (Vrijling, 1985) worden standaardwaarden $\beta = 1$ en $k = 3$ aangehouden. Het resultaat moet nog wel worden vertaald naar een individuele polder door te delen door het aantal onafhankelijke, vergelijkbare polders.

3.3.3 Normering van de waterkering

Het dijkvak heeft een normering van 1/150 per jaar, wat inhoudt dat hij bestand moet zijn tegen een waterstand die statistisch gezien gemiddeld eens in de 150 jaar voorkomt. Deze normering komt voort uit een bestuurlijke keuze, gebaseerd op (maar niet direct volgend uit) een analyse van de mogelijk optredende schade. De schade die wordt berekend met de SOBEK- en SSM-berekeningen bedraagt ca. 820 miljoen euro (zie paragraaf 3.2). Op basis hiervan zou de kering conform (STOWA, 2008) als IPO-klasse V worden geclassificeerd, met bijbehorende overschrijdingskans van 1/1.000 per jaar. Delen van de kering zijn rond 2016 versterkt op basis van een 1:1.000 norm.

OVERSCHRIJDINGSKANSNORM PER VEILIGHEIDSKLASSE, NA AANPASSING PRIJSPEIL

Veiligheidsklasse	Directe economische gevolgschade [M€, prijspeil 2019]	Overschrijdingskansnorm [1/jaar]
I	< 12,5	1/10
II	12,5 – 40	1/30
III	40 – 125	1/100
IV	125 – 400	1/300
V	> 400	1/1.000

Figuur 3-7: IPO-klassen regionale waterkeringen (STOWA, 2008)

3.3.4 Werkwijze

Voor de pilot zijn overstromingsberekeningen gemaakt met behulp van SOBEK. Hiermee wordt het verloop van de overstroming bij een dijkdoorbraak en de uiteindelijke waterdiepte in het achterliggende gebied berekend. Door de resultaten van deze berekeningen te gebruiken als input in SSM2017 kan vervolgens de ontstane schade, de mortaliteit en het aantal slachtoffers als gevolg van de overstroming worden berekend. Mortaliteit wordt berekend per gridcel conform (Deltares, april 2017), waarbij wordt gekeken naar de optredende waterdiepte, stijgsnelheid en stroomsnelheden.

Om te voorkomen dat modelartefacten of uitschieters in de berekende mortaliteit maatgevend worden voor de overstromingskans wordt conform (Deltares, 2011) de mediaan van de mortaliteit per buurt berekend. Hiervoor wordt het buurtenbestand van het CBS gebruikt.

In de pilot is een aantal scenario's doorgerekend, waarbij bijvoorbeeld maatregelen worden genomen om de onderdoorgang onder het spoor en de snelweg af te sluiten, of waarbij de bres in de waterkering na 48 uur wordt gedicht. In deze analyse wordt naar het 'originele' scenario gekeken, waarin het water ongehinderd het gebied ten oosten van de snelweg kan bereiken.

Voor P_1 , de kans op overstroming, wordt uitgegaan van de vereiste overstromingskans van de waterkering. De normfrequentie van het dijkvak bedraagt 1/150 per jaar. Dit is echter de overschrijdingsfrequentie van de normwaterstand, en niet de overstromingskans. Om te komen tot een overstromingskans op doorsnedeniveau wordt op basis van (STOWA, juli 2021) de normfrequentie vermenigvuldigd met een factor van 0,2². De faalkans voor dijkvak 419 kan hiermee worden gelijkgesteld aan $1/150 * 0,2 = 1/750$ per jaar.

P_2 , de mortaliteit, volgt zoals hierboven beschreven uit de resultaten van de SSM-berekeningen.

² Deze factor volgt uit de IPO-richtlijn, een duidelijke onderbouwing ontbreekt en krijgt nader aandacht binnen het ORK. Volgens de IPO-aanpak wordt geen rekening gehouden met bv. lengte-effectfactoren. Deze factor 0,20 geeft dus vrijwel zeker geen accuraat beeld van de daadwerkelijke overstromingskans. In het kader van deze pilot wordt uitgegaan van de waarde 0,20.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

P_3 , de kans op aanwezigheid van een individu op een bepaalde locatie, wordt bepaald door de mogelijkheid tot evacuatie. Er geldt: $P_3 = 1 - \text{evacuatiefractie}$. Het gaat hierbij om preventieve evacuatie, oftewel voorafgaand aan het falen van de waterkering. Aangezien er voor overstromingen van regionale waterkeringen voor zover bekend geen evacuatieplannen bestaan (deze worden in ieder geval niet meegenomen in de SSM-berekeningen) wordt aangenomen dat P_3 gelijk is aan 1.

Met bovenstaande parameters kan het huidige LIR (aangenomen dat de overstromingskans gelijk is aan de overstromingskans) worden berekend met de volgende formule:

$$\text{LIR} = 1/750 * \text{Mortaliteit}$$

De vereiste overstromingskans van de waterkering kan als volgt worden berekend:

$$P_{1,\min} = 1E-5 / \text{Max}(\text{Mediane mortaliteit op buurniveau})$$

Voor het groepsrisico worden de berekende slachtoffers uitgezet tegen de volgens de in paragraaf 3.3.2 beschreven formule toelaatbare aantallen bij verschillende terugkeertijden.

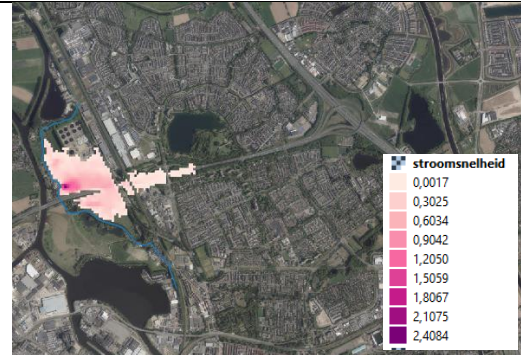
3.3.5 Mortaliteit

De mortaliteit wordt berekend op basis van waterdiepte, stroomsnelheid en stijgsnelheid.

Onderstaand worden de resultaten van de overstromingsberekening voor deze parameters en de hieruit resulterende mortaliteit weergegeven.



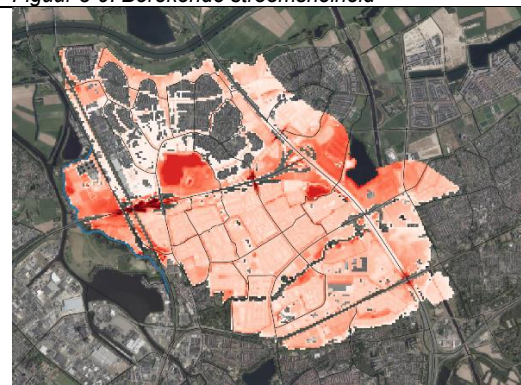
Figuur 3-8: Berekende waterdiepte



Figuur 3-9: Berekende stroomsnelheid

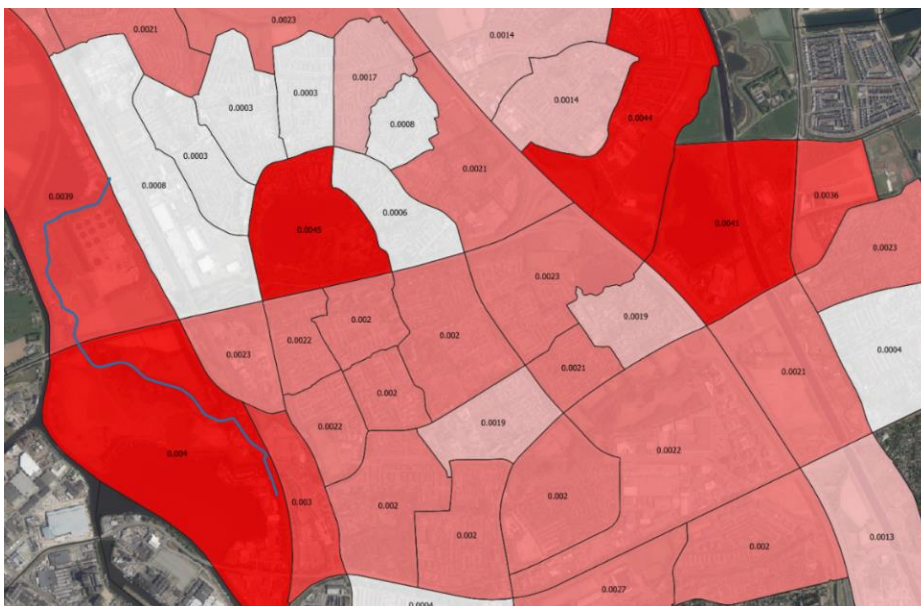


Figuur 3-10: Berekende stijgsnelheid



Figuur 3-11: Mortaliteit

Wanneer de mortaliteit per gridcel wordt omgerekend naar de mediane mortaliteit op buurtniveau resulteert dit in de waarden weergegeven in Figuur 3-12.



Figuur 3-12: Mediane mortaliteit per buurt

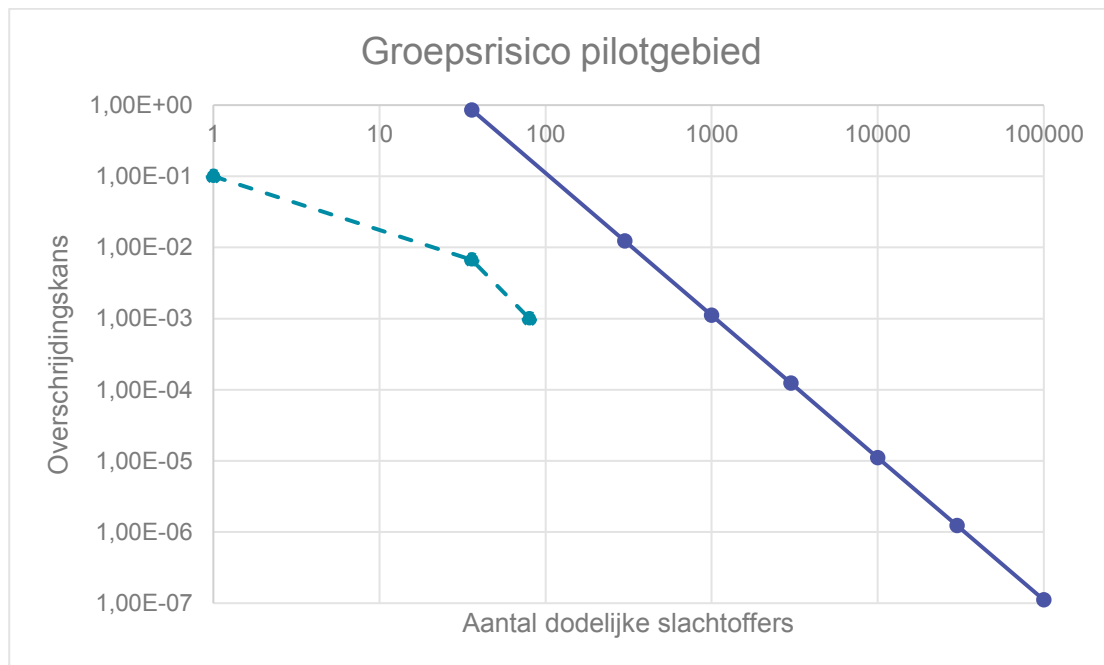
3.3.6 LIR

De hoogste mortaliteit op buurtniveau heeft een waarde van 0,0046. Dit resulteert in een LIR van $6,1E-6$, dit is kleiner dan de eis van $1E-5$.

Om aan het vereiste LIR van $1E-5$ te voldoen is (gegeven de hoogste waarde van de mortaliteit van 0,0046) een maximale overstromingskans van $1/457$ per jaar benodigd.

3.3.7 Groepsrisico (indicatief)

Bij een doorbraak van het dijkvak in het hierboven beschouwde scenario vallen volgens de SSM-berekening 36 dodelijke slachtoffers. Daarnaast zijn extra overstromingsberekeningen (hier verder niet gerapporteerd) uitgevoerd bij een terugkeertijd van 10 en een van 1.000 jaar. Hieruit volgen respectievelijk 1 en 80 slachtoffers. Wanneer deze slachtoffers en de kans op optreden worden uitgezet tegen de in paragraaf 3.3.2 gedefinieerde eis t.a.v. het *nationale* groepsrisico voor regionale keringen volgens Vrijling, dan is te zien dat deze aantallen ruim onder de maximaal toelaatbare slachtoffers liggen, zie Figuur 3-13. De richtwaarde voor een individuele regionale kering/polder is echter aanzienlijk strenger. Te zien is dat er sprake is van een marge van ruim een factor 100. Het is echter de vraag of die marge zou volstaan als de eis op nationaal niveau zou worden vertaald naar een eis voor deze regionale kering/polder, gelet op het grote aantal vergelijkbare regionale keringen/polders in Nederland.



Figuur 3-13: Berekende aantal dodelijke slachtoffers (blauwgroen) uitgezet tegen eis groepsrisico (paars)

3.4 Conclusies/discussie

In dit hoofdstuk is onderzocht wat de gevolgen zijn van een overstroming van het pilotgebied. Met behulp van de Schade- en Slachtoffermodule (SSM2017) wordt een schade van ca. 820 miljoen euro berekend, daarnaast vallen er volgens deze berekening 36 dodelijke slachtoffers.

Overstromingsberekening

De in deze pilot beschouwde gevolgen van een overstroming zijn gebaseerd op overstromingsberekeningen in SOBEK. Bij deze berekeningen wordt een aantal kanttekeningen geplaatst:

- Om een juiste inschatting van het overstroomde gebied en de diepte van de overstromingen te maken, is de maatgevende situatie berekend aan de hand van dynamische aanvoer van de Dommel en Aa en waterstanden op de Maas. Dit is gedaan aan de hand van een bestaand stromingsmodel wat is gebruikt in de studie naar de samenhang van de afvoergolven van de Aa, Dommel en Maas (HKV, 2008). Het uitgangspunt is dat dit model geschikt is voor deze berekeningen, het model en de uitgangspunten zijn niet gecontroleerd.
- In het 2D model zijn geen 1D watergangen opgenomen, dit maakt verschil in het resultaat van waterdiepte en met name de snelheid waarin dit gebeurt. De uitgevoerde berekening kan daarmee het effect van dergelijke kortsluitingen onderschatten. Tijdens de analyse van de resultaten wordt hier kwalitatief aandacht aan besteed.
- In het SOBEK-model is de AHN2 toegepast, deze gegevens zijn mogelijk achterhaald. Binnenkort komt het AHN4 beschikbaar, aangeraden wordt om de overstromingsberekeningen te updaten op basis hiervan.
- Er is gerekend met een resolutie van 25 m. In de leidraad overstromingssimulaties wordt geadviseerd om in kleine (stedelijke) gebieden te rekenen met een resolutie van 5 m. De mate van detail van de uitgevoerde berekeningen is daarmee beperkt maar wel voldoende om op hoofdlijnen uitspraken te doen over waterdieptes en de verandering in het veiligheidsniveau.

Voor een daadwerkelijke studie naar de gevolgen van een doorbraak van het dijkvak wordt aanbevolen bovenstaande aandachtspunten in overweging te nemen.

Over het algemeen is het voor een toetsing van een regionale kering niet nodig om overstromingsberekeningen te maken. De bestaande normering is voor de meeste keringen gebaseerd op een bestaande overstromingsberekening, deze zijn (inclusief de optreden schade, slachtoffers etc. berekend met SSM2017) terug te vinden op de website van het Landelijk Informatiesysteem Water en Overstromingen ([Home | LIWO \(basisinformatie-overstromingen.nl\)](http://Home | LIWO (basisinformatie-overstromingen.nl))). Hierbij wordt opgemerkt dat niet geheel duidelijk is in hoeverre deze berekeningen actueel zijn. Door veranderingen in gebiedsinrichting, bijvoorbeeld door nieuwbouw, maar ook door inflatie zou het kunnen dat potentiële schadebedragen toenemen. Hiermee zou mogelijk ook de normering verzaamd moeten worden.

Schadebedrag

De berekende schade als gevolg van een doorbraak van het dijkvak lijkt in eerste instantie erg hoog. In het rapport 'Overstromingsbeelden regionale keringen Den Bosch' (HKV, december 2013), waarin vergelijkbare schade en slachtoffers werden berekend (gebaseerd op dezelfde informatie) zijn deze gevolgen daarom vergeleken met een overstromingsberekening in Dordrecht met een kleinere omvang. Deze leidde tot een schade van 500 miljoen euro, waaruit werd

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

geconcludeerd dat de orde van grootte van de berekende schade klopt. Ook vergeleken met de recente overstromingen in Limburg, waarvan de schade wordt geschat op 1,8 miljard euro, lijkt de orde van de grootte van het schadebedrag niet uitzonderlijk.

Daarbij wordt opgemerkt dat de indirecte schade, bijvoorbeeld door uitval van de A59, de rioolwaterzuiveringsinstallatie en de bedrijventerrein achter het spoor nog niet in de schadeberekening is meegenomen. Geschat wordt dat deze schade in de orde van enkele tientallen miljoenen euro's ligt.

Schade in relatie tot normering

Conform Tabel 3-5 (uit het rapport Richtlijn normering keringen langs regionale rivieren (STOWA, 2008)) zou de kering in IPO-klasse V moeten vallen, met een bijbehorende normfrequentie van 1/1.000 jaar. Dit is een strengere norm dan de vigerende norm. Dat komt niet door de onderzochte aanpassingen van de normeringmethode (zoals rekening houden met indirecte schade en slachtoffers/groepsrisico). Verklaring schuilt meer in het feit dat de huidige normering van 1/150 jaar een bestuurlijke keuze is die niet één op één volgt uit de resultaten van schadeberekeningen voor het achterliggende gebied.

Tabel 3-5: Normering keringen langs regionale rivieren (STOWA, 2008)

Klasse	Veiligheidsnorm	Gevolgschade voor de klasse [mln. Euro]	Frequentie van de maatgevende rivierwaterstand voor bepaling gevolgschade
I	1/10	< 8	1/10
II	1/30	8 - 25	1/30
III	1/100	25 - 80	1/100
IV	1/300	80 - 250	1/300
V	1/1.000	>250	1/1.000

Vergelijking met Waterschadeschatter

Zoals beschreven in paragraaf 3.2.4 is de berekende schade met SSM2017 in orde van grootte vergelijkbaar met die berekend met de Waterschadeschatter (WSS). Het grootste verschil wordt veroorzaakt door de berekende schade aan infrastructuur, wat vermoedelijk wordt veroorzaakt door de conservatieve uitgangspunten in WSS met betrekking tot de herstelduur van de overstroomde snelweg.

Slachtoffers

Normaliter wordt aangenomen dat doorbraken van regionale waterkeringen voornamelijk een wateroverlastprobleem zijn, en minder een waterveiligheidsprobleem. Bij een doorbraak van de dijk wordt echter een significant aantal dodelijke slachtoffers berekend. Dit lijkt te worden veroorzaakt door het feit dat hier sprake is van een regionale rivier waarvan de maatgevende waterstand enkele meters hoger ligt dan de dagelijkse. Hierdoor is ook het verval over de kering aanzienlijk groter dan bij de meeste regionale keringen.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Hierbij moet worden opgemerkt dat dit wordt veroorzaakt door een groot overstroomd gebied met beperkte mortaliteit, waarin de waterdiepte en optredende stroomsnelheden beperkt zijn. In de praktijk lijkt het moeilijk voor te stellen dat hier daadwerkelijk mensen verdrinken, ook omdat het water in dit gebied pas na enige tijd arriveert, waardoor mensen de tijd hebben om te vertrekken. Wanneer een evacuatiefractie wordt gehanteerd zal dit naar verwachting leiden tot lagere aantallen slachtoffers.

LIR en groepsrisico

In deze pilot is bekeken of het LIR of het groepsrisico maatgevend zouden kunnen zijn voor de normering van het dijkvak. Hoewel dit niet het geval lijkt te zijn (waarbij wordt opgemerkt dat de eis op nationaal niveau niet is vertaald naar de individuele polder) is het niet uitgesloten dat dit (v.w.b. het LIR) voor andere keringen langs regionale rivieren wel het geval is.

Het verdient daarom aanbeveling om bij de normering van keringen langs regionale rivieren niet alleen de schade maar ook de potentiële slachtoffers in ogenschouw te nemen. Hiertoe zou als eerste check de reeds beschikbare overstromingsberekeningen van het LIWO geraadpleegd kunnen worden. Wanneer hierin significante aantallen dodelijke slachtoffers worden berekend kan door de mediane mortaliteit per buurt te berekenen bepaald worden of het LIR ergens maatgevend is.

Ook als het groepsrisico op dodelijke slachtoffers niet maatgevend blijkt te zijn kan worden overwogen om een groepsrisico-eis voor getroffen en in plaats van voor dodelijke slachtoffers te hanteren, aangezien ook dit maatschappij-ontwrichtend kan werken.

Gevolgen per deelgebied

De overstromingsberekeningen tonen aan dat het water na doorbraak door de viaduct naar het achterland stroomt en veel schade veroorzaakt aan woningen en bedrijven. Uit een analyse van de gevolgen per deelgebied blijkt dat vrijwel alle schade en slachtoffers optreden in het gebied achter het viaduct. Wanneer kan worden voorkomen dat het water dit gebied bereikt zou dit de gevolgen sterk reduceren. In het volgende hoofdstuk wordt deze mogelijkheid nader onderzocht.

4 (Water)systeemmaatregelen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt onderzocht welke eventuele (water)systeemmaatregelen genomen kunnen worden om de gevolgen bij een overstroming nog te beperken. Daarbij is een onderscheid te maken in een definitieve maatregel of een tijdelijke (nood) maatregel. In dit hoofdstuk is onderzocht of een maatregel getroffen kan worden en op welke manier dit ingezet kan worden.

Hierbij wordt opgemerkt dat het doel van dit onderzoek niet was om tot realistische maatregelen die daadwerkelijk kunnen worden toegepast uit te werken, maar om na te gaan of het überhaupt kansrijk is om een systeemmaatregel mee te nemen in de normering van een waterkering. Kostenbepaling is daarom buiten ogenschouw gelaten.

Ten hoeve van de besluitvorming over de te beschouwen gevolgen worden in dit hoofdstuk de volgende vragen beantwoord:

- Welke (water)systeemmaatregelen zijn mogelijk om de gevolgen van een overstroming te beperken? (§4.1.1 en 4.1.2)
- Wat is het effect van deze maatregelen op de overstromingsberekening en op de optredende schade en slachtoffers? (§4.2)
- In hoeverre zijn deze maatregelen haalbaar? (§4.3)

Het hoofdstuk wordt afgesloten met enkele conclusies en bevindingen in §4.4.

4.1.1 Mogelijke watersysteemmaatregelen

Het uitgangspunt van deze pilot bij het nemen van maatregelen na optreden van een doorbraak was in eerste instantie maatregelen in het watersysteem, bijvoorbeeld het afdammen van de watertoevoer. Dit kan een kansrijke maatregel zijn voor boezemsystemen, waar het volume van het watersysteem en het doorstroomoppervlak van de watergangen doorgaans beperkt is. Bij een regionale rivier als de Dieze wordt dit echter minder haalbaar geacht, zeker omdat hij gevoed wordt door meerdere bronnen (Aa, Dommel, Zuid-Willemsvaart) die niet zomaar afgesloten kunnen worden.

Een andere watersysteemmaatregel die genomen kan worden is het inzetten van overloopgebieden voor waterberging. Bovenstrooms van de Dieze zijn meerdere waterbergingsgebieden beschikbaar. Merendeel waaronder HOWABO en Bosschebroek worden ingezet wanneer het maatgevende toetspeil van 4,90 m+NAP op de Dieze wordt overschreden. Op dit moment is geen extra bergingscapaciteit beschikbaar.

4.1.2 Andere systeemmaatregelen

Omdat maatregelen in het watersysteem niet mogelijk blijken, wordt tevens gekeken naar maatregelen die binnen het overstroomde gebied kunnen worden genomen. In paragraaf 3.2 is gebleken dat het grootste gedeelte van de schade en slachtoffers optreden in het gebied ten oosten van de spoorlijn, nadat het water via de A59 onder het spoorviaduct door is gestroomd. In

dit hoofdstuk wordt daarom onderzocht of het mogelijk is om dit viaduct af te sluiten voor het aankomende water, en wat hiervan de gevolgen zijn. Daarnaast wordt onderzocht wat de gevolgen zijn van het kort na de dijkdoorbraak dichtten van de bres.

4.2 Effect van maatregelen op schade en slachtoffers

Om de effecten van bovenstaande maatregelen te onderzoeken is een aantal aanvullende SOBEK-berekeningen gemaakt. Naast scenario 1 (noordelijke bres) en 2 (zuidelijke bres) zijn de volgende scenario's onderzocht:

- Scenario 3: Noordelijke bres, na 48 uur gedicht
- Scenario 4: Noordelijke bres met afsluiting spoorviaduct
- Scenario 5: Noordelijke bres met afsluiting spoorviaduct & na 48 uur bres dicht

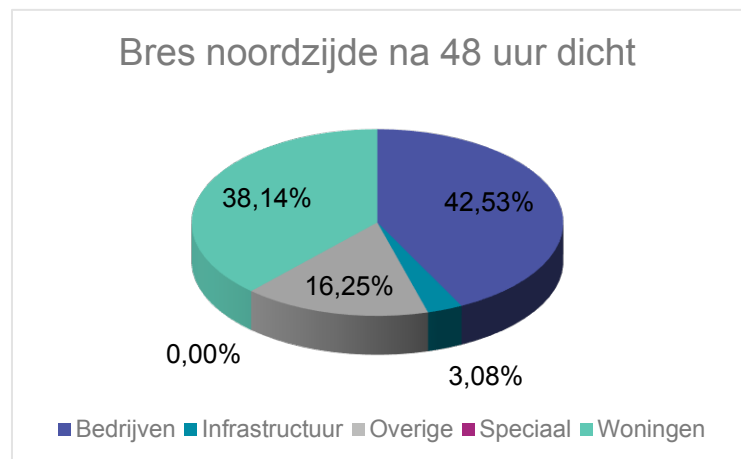
4.2.1 Scenario 3: Noordelijke bres, na 48 uur gedicht

Dit scenario komt voort uit de gedachte dat wanneer de bres kort na het ontstaan van de overstroming wordt gedicht, de hoeveelheid binnenstromend water beperkt wordt en hiermee de schade en slachtoffers gereduceerd. Omdat het dichtten van een bres waar snelstromend water doorheen gaat technisch uitdagend is wordt ervan uitgegaan dat hiervoor enige tijd benodigd is, zo moet er materieel en materiaal worden aangevoerd en moet er een plan worden opgesteld. Een duur van 48 uur is een conservatieve inschatting.

Er is een aanvullende SOBEK-berekening gemaakt gebaseerd op scenario 1, waarbij na 48 uur de bresopening wordt gedicht. Uit de resultaten blijkt dat dit het stromingsbeeld niet significant verandert, en dat het gebied ten oosten van het spoor alsnog overstroomt. In onderstaande tabel en grafiek is te zien dat de totale schade (van 820 miljoen naar 720 miljoen) en slachtoffers (van 36 naar 30) iets afnemen, maar dat het globale beeld hetzelfde blijft.

Tabel 4-1: Totale schade scenario 3

Categorie	Schade [euro]
Bedrijven	€ 306.700.000
Infrastructuur	€ 22.200.000
Overige	€ 117.190.000
Speciaal	€ 0
Woningen	€ 275.000.000
Totaal	€ 721.090.000



Figuur 4-1: Soort schade scenario 3

4.2.2 Scenario 4: Noordelijke bres met afsluiting spoorviaduct

Vervolgens is gekeken wat er gebeurt als het water niet meer door de viaduct over de A59 naar het achterland kan stromen. In eerste instantie bleek uit de aangepaste berekening dat er via een duiker onder het spoor alsnog water naar het achtergelegen gebied kan stromen (zie linkerzijde van figuur 4-2). Ingeschat wordt dat deze duiker relatief eenvoudig voorzien kan worden van afsluitingen, waardoor deze niet meer tot overstroming van het achterliggende gebied kan leiden. Daarom is de SOBEK-berekening aangepast zodat naast het viaduct ook de duiker wordt afgesloten. De resultaten van deze berekening zijn aan de rechterzijde van Figuur 4-2 weergegeven.



Figuur 4-2: Maatregel t.p.v. viaduct; links zonder afsluiting duiker onder het spoor, rechts met.

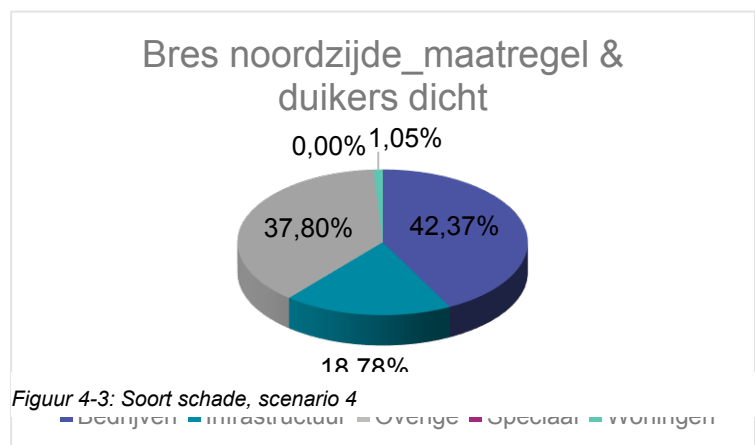
Zoals verwacht zorgt het nemen van deze maatregelen voor een grote reductie van de optredende schade en slachtoffers. De totale schade neemt af van 820 miljoen naar 8 miljoen euro, en het aantal dodelijke slachtoffers van 36 naar 0.

Tabel 4-2: Totale schade scenario 4

Categorie	Schade [euro]
Bedrijven	€ 3.430.000
Infrastructuur	€ 1.520.000
Overige	€ 3.060.000
Speciaal	€ 0
Woningen	€ 85.000
Totaal	€ 8.095.000

4.2.3 Scenario 5: Noordelijke bres met afsluiting spoorviaduct & na 48 uur bres dicht

Ten slotte is een combinatie van bovenstaande maatregelen beschouwd, waarbij zowel het viaduct en de duiker worden afgesloten en de bres na 48 uur wordt gedicht. Aangezien het water binnen enkele uren het kleine gebied tussen waterkering, spoor en snelweg heeft gevuld heeft dit geen aanvullende reductie op schade of slachtoffers tot gevolg ten opzichte van scenario 4.



Figuur 4-3: Soort schade, scenario 4

■ Bedrijven ■ Infrastructuur ■ Overige ■ Speciaal ■ Woningen

4.2.4 Schade en slachtoffers

In Tabel 4-3 is een overzicht gegeven van het effect van de verschillende maatregelen ten opzichte van het 'basisscenario'. Hieruit blijkt dat met name het afsluiten van de onderdoorgangen onder het spoor een groot effect hebben. tonen dat een maatregel ter plaatse de A59 bij de viaduct een zeer effectieve maatregel zal zijn om de gevolgen van een overstroming te beperken. Met deze maatregel zou volgens de IPO-normering de veiligheidsklasse verlaagd kunnen worden van de hoogste (V) naar de laagste of op één na laagste klasse (I of II), zoals geïllustreerd in Figuur 4-4.³


Tabel 4-3: Schade, aantal slachtoffers en getroffen en na een overstroming bij verschillende maatregelen

Scenario	Beschrijving	Schade [€]	Aantal slachtoffers zonder evacuatie	Aantal getroffenen
Scenario 1	Bres aan noordzijde, basisscenario	820.000.000	36	20.850
Scenario 3	Bres aan noordzijde na 48 dicht	720.000.000	30	19.140
Scenario 4	Doorgang viaduct dicht en duikers dicht	8.100.000	0	3
Scenario 5	Bres aan aan de noordzijde na 48 dicht & doorgang viaduct dicht en duikers dicht	8.100.000	0	3

De resultaten van de berekeningen uit tabel 7-1 tonen dat het effect van het afdichten van de doorgang bij de viaduct en het dichten van de duikers tot een groot verschil in de schade, slachtoffers en getroffen en leidt. Het verschil in schade en slachtoffers die volgen ten opzichte van de basisberekening (scenario 1) leidt tot geheel ander veiligheidsniveau. Hierbij zou een goed werkende maatregel zelfs kunnen leiden tot de laagste veiligheidsklasse.

NORMERING VOOR KERINGEN LANGS REGIONALE RIVIEREN

Klasse	Veiligheidsnorm	Gevolgschade voor de klasse [mln. Euro]	Frequentie van de maatgevende rivierwaterstand voor bepaling gevolgschade
I	1/10	< 8	1/10
II	1/30	8 - 25	1/30
III	1/100	25 - 80	1/100
IV	1/300	80 - 250	1/300
V	1/1.000	>250	1/1.000



Figuur 4-4: Effect maatregelen op gevolgschade en toekennen normering.

³ Hierbij wordt opgemerkt dat de huidige normering niet gebaseerd is op deze tabel, maar op een bestuurlijke maatregel zoals elders in dit document toegelicht. Met de huidige normfrequentie van 1/150 jaar zou de kering tussen IPO-klasse III en IV vallen.

4.3 Haalbaarheid noodmaatregel

In deze paragraaf is onderzocht in hoeverre het haalbaar is om het viaduct af te sluiten in geval van een (dreigende) overstroming. Gekeken is naar het toepassen van een noodmaatregel welke onder hoge tijdsdruk plaats moeten vinden. Op de website 'Wiki Noodmaatregelen Waterkeringen (<https://vweb002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen>) is een overzicht van alle relevante kennis, hulpmiddelen en ervaringen voor de inzet van noodmaatregelen voor waterkeringen gegeven bij een (dreigende) overstroming. Het waterschap Aa en Maas is betrokken geweest bij het opstellen van deze website en heeft hiervoor kennis aangeleverd.

Benadrukt wordt dat het doel van deze paragraaf niet is om een realistische noodmaatregel uit te werken, maar om na te gaan wat er nodig is om een noodmaatregel toe te kunnen passen en hier rekening mee te houden in de normering. Kosten zijn buiten ogenschouw gelaten.

Op de website WIKI Noodmaatregelen is een afstudeerscriptie 'De inzet van zandzakken als noodmaatregel tegen dreigende overstromingen' van Pieter de Vries d.d. 16-06-2020 te vinden. In dit onderzoek zijn werkinstructies beschreven voor de inzet van zandzakken als noodmaatregel. In detail is beschreven welke type zandzakken geschikt zijn en op welke manier deze gevuld en geplaatst moeten worden. De scriptie is als bron gebruikt om te beschouwen in welk tijdsbestek een noodmaatregel met zandzakken te realiseren is en of dit überhaupt wel haalbaar is.

Het is interessant om te weten in welk tijdsbestek een noodkering van zandzakken is op te bouwen. Als maatregel is bedacht om langs de A59 bij de Treurbrug 'nooddammen' aan te leggen. Om dit te kunnen bepalen moet rekening gehouden worden met de technische, logistieke en organisatorische aspecten die er bij komen kijken voor het realiseren van zo'n noodkering. In de onderstaande paragrafen zijn de aspecten opgesomd die van belang zijn en de informatie die daar over te vinden is op de WIKI Noodmaatregelen opgesomd.

4.3.1 Snelheid vullen zandzakken

Het vullen van zandzakken kan op verschillende manieren gebeuren, namelijk handmatig of met gebruik van apparatuur. Hoe snel zandzakken gevuld worden is afhankelijk van de vulmethode.



Figuur 4-5: Verschillende vulmethodes zandzakken

Onderstaand zijn de methodes in een tabel gezet, met de inzet van het aantal mensen.

Tabel 4-4: Vulsnelheid voor verschillende vulmethodes zandzakken

Methode	Aantal personen	Aantal zandzakken per uur	Zandzak per persoon per uur
Handmatig met dichtbinden	10	200	20
Handmatig zonder dichtbinden	10	500	50
Zandzakvulapparatuur	2 à 3	600	200
Zandzakvulmachine	4 (?)	1000	250

4.3.2 Vervoer zandzakken

In de praktijk heeft zich het vullen van zakken op een centrale vullocatie als goede methode bewezen. De zakken kunnen na het vullen dichtgebonden of dichtgenaaid en op pallets opgeslagen worden. Vanuit dit centrale punt kunnen de pallets met zandzakken vervoert worden. Op een pallet passen rond 50 zandzakken en bereikt een volle pallet een gewicht van 850 kg. De laadcapaciteit per vrachtwagen is gemiddeld zo'n 600 zakken (10,2 ton).

Indien het zand uit een zanddepot geleverd moet worden (bijvoorbeeld het zanddepot van de gemeente Den Bosch), moet het nog mogelijk zijn om de zandzakken aan te leveren. In dit voorbeeld zouden de zandzakken over de A59 aangevoerd moeten worden. In de situatie waarbij er nog geen bres is ontstaan en de A59 nog niet onder water staat, kan het materiaal nog aangevoerd worden (zie figuur 3-3). Als de overstroming al heeft plaatsgevonden wordt de aanvoer bemoeilijkt, omdat de A59 hierbij al snel onder water komt te staan.



Figuur 4-6: Route transport zandzakken

4.3.3 Werkinstructies/calamiteitenoefeningen met aannemers

Van belang is hoe snel de manschappen paraat kunnen staan met materieel en hoe efficiënt gewerkt kan worden. Dit is afhankelijk van de werkinstructies die gegeven worden en door calamiteitenoefeningen op te zetten. Bij bijvoorbeeld waterschap Aa en Maas krijgen lokale aannemers een training over wat ze moeten doen als er calamiteiten ontstaan tijdens hoogwater. Deze ondernemers hebben een zogenoemd waakvlamcontract met het waterschap. Als er een noodsituatie ontstaat op de dijk, moeten ze binnen een afgesproken korte tijd paraat staan met manschappen en materieel.

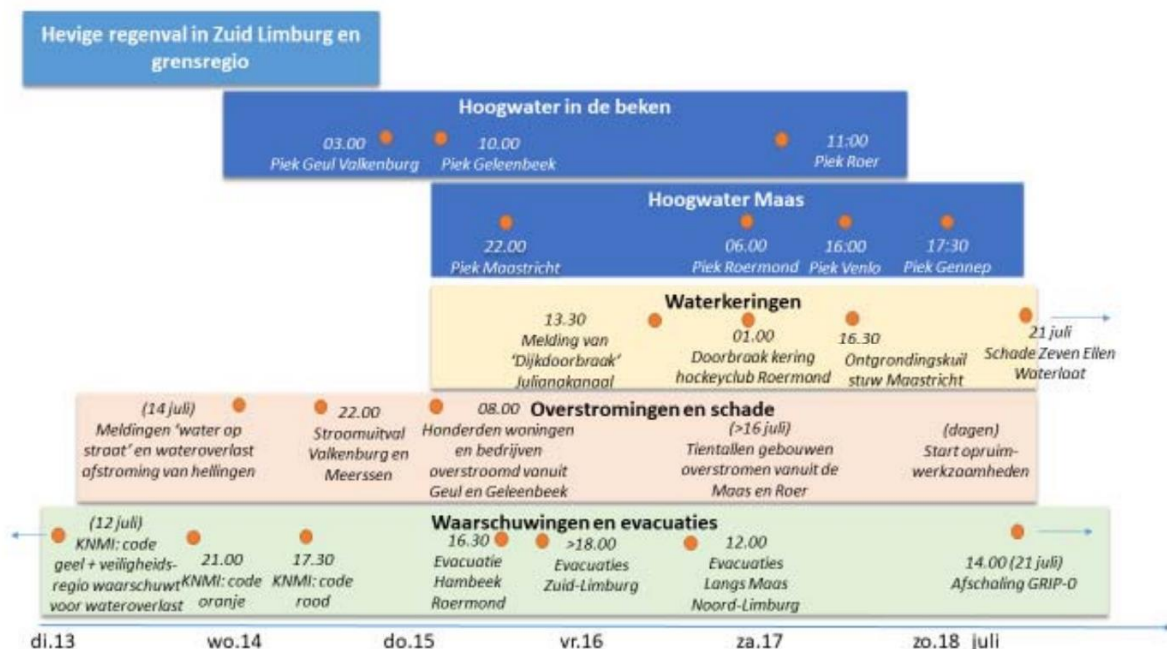
Vervolgens is een goede werkinstructie van belang. De effectiviteit van zandzakken wordt bepaald door het juist vullen van de zakken. Een propvolle zandzak kan bij de latere inbouw in de verbinding met andere zandzakken niet nauwsluitend worden ingevoegd. Het effen en sluitend aan elkaar liggen van de zandzakken in verbinding is echter een vereiste voor een goede afdichting. Zandzakken dienen alleen voor 2/3 van de inhoud met zand te zijn gevuld. Daarnaast is de wijze van plaatsen van zandzakken van belang. De onderste laagzandzakken moeten hierbij aan de buitendijkse kant parallel met de stroming te lopen, waarbij de vulopening niet naar het water toe maar naar de binnendijkse kant moet wijzen. Alle zandzakken moeten elkaar overlappend geplaatst worden zodat geen tussenruimte ontstaat. De zandzakken moeten dakpansgewijs gelegd worden. Voor een verhoogde stabiliteit moeten de zandzakken laagsgewijs worden aangestampt. Doormiddel van goede werkinstructies en calamiteitenoefeningen is het mogelijk veilig, efficiënt en snel op te treden.

4.3.4 Beschikbare tijd om te handelen

In de tijd van nood is een inschatting nodig welke tijd beschikbaar is om bij hoogwater te kunnen handelen. Daarbij is onderscheid te maken in preventief handelen en reactief handelen.

In het geval van preventief handelen dient ingeschat te worden hoeveel tijd er is voordat er sprake is van een noodsituatie. Preventief kan gehandeld worden bijvoorbeeld wanneer het KNMI een code afgeeft en/of de veiligheidsregio waarschuwt voor wateroverlast.

Ter voorbeeld is in figuur 4-7 de tijdslijn van gebeurtenissen tijdens het hoogwater in Limburg (Hoogwater 2021 Feiten en Duiding, Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2021) gegeven. Uit deze tijdslijn blijkt dat er 2 dagen tussen de waarschuwing voor wateroverlast tot het moment van evacueren heeft gezeten. Deze situatie is natuurlijk niet vergelijkbaar met de Dieze, maar geeft enige indicatie van de hoeveelheid tijd tussen de eerste waarschuwingen en de daadwerkelijke dijkdoorbraak.



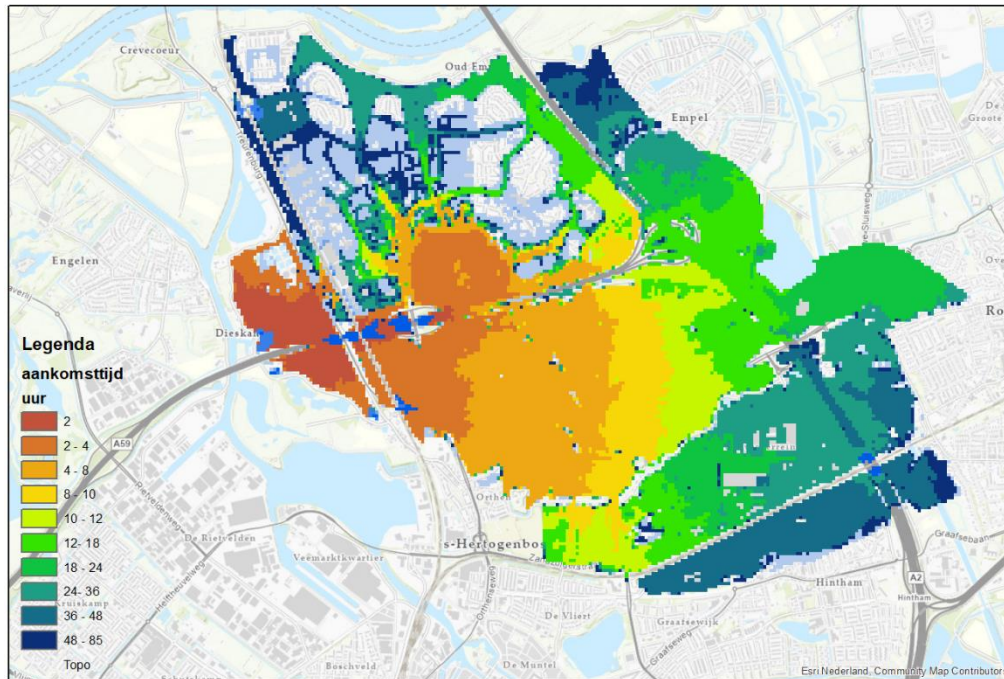
Figuur 1.1: Algemene tijdslijn met enkele kenmerkende gebeurtenissen tijdens het hoogwater in juli 2021. Dit betreft geen volledig overzicht meer informatie over deze en andere gebeurtenissen is gegeven in de betreffende hoofdstukken

Figuur 4-7: Tijdslijn gebeurtenissen tijdens hoogwater 2021 (bron: Hoogwater 2021 Feiten en Duiding, Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2021)

De vraag is hoeveel tijd voor preventief handelen is er in het geval van het pilot gebied? Hoge waterstanden in 's-Hertogenbosch treden op als gevolg van relatief hoge afvoeren van de Aa en de Dommel, in combinatie met hoge waterstanden op de Maas. Als uitgangspunt voor de hoogwaterberekeningen is gesteld dat de kans op samenvallen van afvoergolven op de Maas en afvoergolven op de Aa en de Dommel 0,8 (80%) is, met een vertraging van de Maaspijk met 55 uur ten opzichte van de Aa en de Dommel. Dit betekent dat de tijd waarin het hoogwater bij de Dieze optreedt langer duurt en minimaal 4 dagen op geanticipeerd kan worden.

In het geval andere factoren dan alleen hoogwater een rol spelen, kunnen situaties ontstaan waarbij geen tijd is om te anticiperen en moet er reactief gehandeld worden.

In dit geval is het van belang te weten wat de aankomsttijd van het water per gebied is om te kunnen handelen. In onderstaand figuur is de aankomsttijd van het water na doorbraak van de noordelijke bres van de dijk in kaart gebracht. Uit deze kaart blijkt dat er ná een doorbraak minder dan 2 uur tijd beschikbaar is om te handelen.



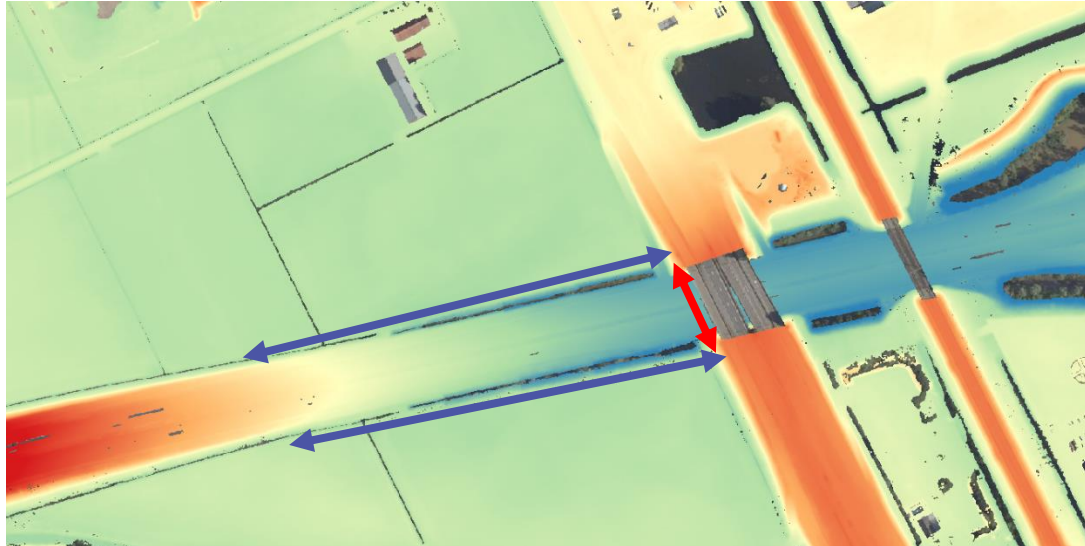
Figuur 4-8: Aankomsttijd van het water bij een bres aan de noordzijde (scenario 1)

4.3.5 Haalbaarheid noodmaatregel 'nooddammen'

Als noodmaatregel voor deze pilot waren nooddammen bedacht langs de noord- en de zuidzijde van de A59. De A59 gaat onder de Treurbrug door, en ligt plaatselijk dieper. Bij een overstroming loopt het water via de A59 door naar het achterliggende gebied.

Voor het bouwen van een nooddam is uitgegaan van 100 zandzakken per 1 m³ (bron: <https://vweb002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen>). Het aantal benodigde zandzakken is ingeschat per maatregel. Berekend is hoeveel uur benodigd is om de zandzakken gereed te hebben per benoemde maatregel zoals. Daarnaast is een inschatting gemaakt van het aantal pallets dat gevuld moet worden en hoeveel ritjes met de vrachtwagen uitgevoerd moet worden.

Om het water tegen te houden zijn er meerdere opties: De onderdoorgang zelf kan worden afgesloten, of er kunnen nooddammen aan weerszijden van de A59 worden aangelegd zodat het water de snelweg niet kan bereiken. Uit de maximale waterdiepte kaart volgt bij een terugkeertijd van 1/150 een waterdiepte van c.a. 3,0 m ter plaatse van het laagste punt van de A59. Bij een terugkeertijd van 1/1000 is de maximale waterdiepte 3,5 m. Op de ongunstige plekken zou een nooddam van 3 m hoog aangebracht moeten worden over een lengte van 250 m.



Figuur 4-9: Bovenaanzicht van onderdoorgang A59 met hoogte o.b.v. AHN3, in paars de nooddammen in langsricting en in rood de noodafsluiting van de A59

De benodigde hoeveelheid zandzakken en tijd om deze uit te voeren per maatregel zijn weergegeven in Tabel 4-5. Te zien is dat voor de ‘nooddammen’ meer dan 100.000 zandzakken benodigd zijn, wat zelfs wanneer gebruik wordt gemaakt van vulmachines dagen zou duren. Hieruit wordt geconcludeerd dat dit geen realistische maatregel is. Het blokkeren van de onderdoorgang vereist minder zandzakken en tijd, desalniettemin zal dit in de praktijk moeilijk te realiseren zijn. Als reactieve maatregel (na het optreden van een doorbraak) is dit sowieso niet mogelijk aangezien het water al na 2 uur door de viaduct over de A59 naar het achtergelegen gebied stroomt.

Tabel 4-5: Tijdsduur uitvoering noodmaatregelen

Maatregel	Zandzakken [aantal]	Handmatig, 10 pers [uur]	Vulmachine 1000 zakken per uur [uur]	Pallets [aantal]	Vrachtwagen Ritjes [aantal]
Dam langs A59, 3 m hoog 500 m lang	150.000	750/300*	150	3000	250
Dam langs A59, 3,5 m hoog 500 m lang	175.000	875/350*	175	3500	292
Dam dwars over A59 t.p.v. viaduct 65 m lang 3 m hoog	19.500	97,5/39*	19,5	390	32,5
Dam dwars over A59 t.p.v. viaduct 65 m lang 3,5 m hoog	22.750	113,75/45,4*	22,75	455	38

*Niet dichtbinden van zakken

4.4 Conclusies/discussie

Conclusies voor pilotgebied

In dit hoofdstuk is onderzocht of de gevolgen van een doorbraak van de dijk verkleind kunnen worden door het nemen van (nood)maatregelen. Geconcludeerd is dat ad-hoc noodmaatregelen in het watersysteem bij een dijkdoorbraak niet kansrijk zijn, daarom is gefocust op maatregelen in het overstroomde gebied. Het grootste effect heeft het afsluiten van de onderdoorgangen van het spoor (viaduct en duikers), waarmee de overstroming beperkt blijft tot het gebied ten westen van het spoor. Hiermee zou volgens de SOBEK- en SSM-berekeningen de schade met een factor 100 verlaagd worden, en alle 36 dodelijke slachtoffers worden voorkomen.

Onderzocht is vervolgens of een dergelijke ingreep als noodmaatregel getroffen zou kunnen worden getroffen, door het aanleggen van een dam van zandzakken om het viaduct af te sluiten.⁴ In het geval van een dijkdoorbraak is er in ieder geval onvoldoende tijd om een noodmaatregel toe te passen, aangezien het water na 2 uur al onder de viaduct naar het achtergelegen woongebied en bedrijventerrein stroomt. Zelfs een relatief eenvoudige handeling als het dichtdraaien van een afsluiter is in deze tijd al lastig, aangezien mensen binnen deze tijd ter plaatse moeten zijn.

Wanneer er preventief wordt gehandeld op basis van (weers)voorspellingen of afvoermodellen is er meer tijd beschikbaar, in de orde van enkele dagen.

Dit geeft de tijd om een logistieke operatie op te zetten om materiaal naar het gebied te vervoeren en te plaatsen. Het uitvoeren van nooddammen in de vorm van zandzakken lijkt ook in dit geval echter geen realistisch scenario, gezien de grote hoeveelheid zandzakken die benodigd zijn. Een meer voor de hand liggende oplossing zou zijn om een coupure in de tunnel te plaatsen, die bij een dreigende overstroming afgesloten kan worden. In dit geval zal de snelweg afgesloten moeten worden, en is de kans op niet tijdig sluiten aanwezig (bijvoorbeeld omdat personeel niet tijdig aanwezig is). Daarnaast lijkt het afsluiten van een belangrijke snelweg vanwege het mogelijk falen van een regionale waterkering ook om andere redenen onwenselijk.

Voor dit pilotgebied zou een permanente maatregel beter passen, hierbij zou gedacht kunnen worden aan een 'kanteldijk' aan weerszijden van de A59, waarmee voorkomen wordt dat het water de tunnel in kan lopen. De kosten en baten van een dergelijke maatregel worden nader uitgewerkt in hoofdstuk 5.

Algemene conclusies

In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat mogelijk te treffen maatregelen bij een (dreigende) overstroming sterk afhankelijk zijn van de locatie. Voor keringen langs regionale rivieren lijkt het

⁴ Van de duikers is afgenomen dat het plaatsen van een afsluiter geen probleem is, hier is geen nader onderzoek naar gedaan.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

nemen van watersysteemmaatregelen minder kansrijk dan voor bijvoorbeeld boezemkeringen, omdat een rivier moeilijker af te sluiten is. Wel zou gebruik gemaakt kunnen worden van overstromings-/waterbergingsgebieden, voor zover deze nog niet in de norm zijn meegenomen.

De kansrijkheid van maatregelen binnen het overstroomde gebied hangt vooral af van de ligging van het gebied en de snelheid waarmee het gebied overstroomt. Bij grote waterstandsverschillen treedt het merendeel van de gevolgen binnen korte tijd (enkele uren) na doorbraak op. Reactieve maatregelen lijken dan niet kansrijk, tenzij het gebied zich hier specifiek voor leent, bv. omdat er een smalle doorgang is die kan worden afgesloten. In de meeste gevallen is het echter beter om te investeren in preventieve maatregelen en/of evacuatieplannen (voor keringen waar volgens LIWO-overstromingsscenario's slachtoffers kunnen vallen).

5 Maatschappelijke kosten baten analyse

In dit hoofdstuk wordt het resultaat een vereenvoudigde/verkennde maatschappelijke kosten-baten analyse (MKBA) beschreven op basis van de aangenomen uitgangspunten in dit onderzoek. Met behulp van deze MKBA is op basis van de onderzoeksdata een optimale ontwerpnorm voor de dijk afgeleid.

In §5.1 wordt de gehanteerde methode toegelicht. In §5.2 worden de waterstanden bij verschillende overschrijdingsfrequenties bepaald. Vervolgens worden de kosten van de dijkversterking (§5.2) en het overstromingsrisico (§5.4) bepaald. Op basis van deze resultaten wordt in (§5.5) de optimale ontwerpnorm voor de dijk afgeleid. Het hoofdstuk wordt afgesloten met enkele conclusies en bevindingen in §5.6.

5.1 Methode

In een MKBA worden de kosten en baten van een dijkversterking tegen elkaar afgewogen. De kosten van een dijkversterking bestaan uit de aanlegkosten en de eventuele extra onderhoudskosten. De baten van een dijkversterking worden gevormd door de afname van het overstromingsrisico. Het risico is de verwachtingswaarde van het schaderisico, het product van kans en schade.

Met een MKBA is de economisch optimale overstromingskans van de waterkering te bepalen. Dit wordt gedaan door de optimale balans te zoeken tussen de kosten van de kering enerzijds en het overstromingsrisico.

In eerste instantie zijn de kosten van de dijkversterking bepaald. Hierbij zijn voor een aantal overstromingskansen de bijbehorende aanleg- en onderhoudskosten bepaald. Vervolgens is voor dezelfde overstromingskansen het overstromingsrisico bepaald. Hiertoe is de kans op een overstroming is vermenigvuldigd met de gevolgschade van deze overstroming is. Op basis van deze resultaten is de optimale ontwerpnorm voor de dijk afgeleid.

Ten behoeve van de eenvoud is aangenomen dat de kans op een overstroming gelijk is aan de kans op het overlopen van de waterkering. Verder is aangenomen dat de schade onafhankelijk is van de locatie van de bres. Ook is aangenomen dat de potentiële schade in de tijd constant is en dat de jaarlijkse overstromingskans dankzij periodiek onderhoud constant is (geen degradatie). Hierdoor spelen herhaalinvesteringen (en hun interval) geen rol bij de bepaling van de optimale overstromingskansen. Dit vereenvoudigt de optimalisatie aanzienlijk.

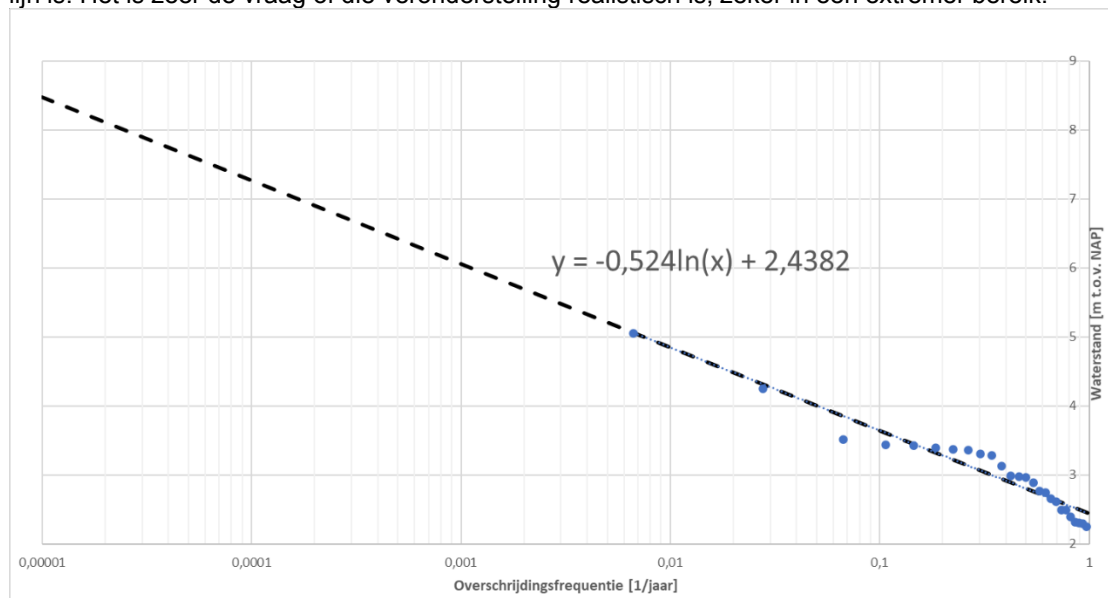
De optimale ontwerpnorm is voor drie gevallen bepaald:

- Scenario 1: de schade is zoals bij Bres Noord zonder maatregelen, zonder sluiting van de bres
- Scenario 4: de schade is zoals bij Bres Noord met maatregelen, zonder sluiting van de bres
- Scenario 5: de schade is zoals bij Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur.

Bij het scenario Bres Noord is een overstroming als gevolg van een bres aan de noordkant van de A59 gebruikt. De situatie van de waterkering in dit scenario is gelijk aan de huidige situatie. Ook bij de andere twee scenario's is de overstroming bij een bres aan de noordkant gebruikt. Bij deze scenario's zijn echter extra maatregelen genomen. Deze maatregelen bestaan uit het afsluiten van de duikers en het aanleggen van een permanente kering parallel aan de A59. Het idee van deze maatregelen is beschreven in hoofdstuk 4. Hier zijn de kosten niet meegenomen. Omdat in de conclusies bleek dat het nemen van noodmaatregelen bij een (dreigende) overstroming niet kansrijk is, wordt er bij de MKBA van uitgegaan dat deze maatregelen permanent zijn aangelegd.

5.2 Waterstanden

Zoals beschreven in paragraaf 2.3 bleek het hydrologische model voor het watersysteem voor deze pilot niet te achterhalen. Daarom is gebruik gemaakt van een beschikbare meetreeks van de waterstand bij spuisluis Crevecoeur om een waterstands-frequentielijn op te stellen. In deze meetreeks is de waterstand dagelijks gemeten voor een periode van 25 jaar (1997-2021). Van deze reeks zijn de jaarmaxima geselecteerd. Vervolgens is hiermee een waterstands-frequentielijn opgesteld. Dit is visueel gedaan, door de jaarmaxima te plotten op semi-logschaal. Het toetspeil van NAP +5,05 bij een norm van 1/150 per jaar is ook uitgezet en bleek goed op de gefitte lijn te passen, wat enig vertrouwen geeft in de resultaten. Het resultaat is weergegeven in Figuur 5-1 en Tabel 5-1. Bedacht moet worden dat het hier een hele grove (maar eenvoudige) benadering betreft. Er is geen zuivere statistische analyse uitgevoerd of naar de fysica van het watersysteem gekeken. De getoonde waterstands-frequentielijn is o.a. gevoelig voor de 'plotting positions' van de jaarmaxima en de veronderstelling dat de overschrijdingskanscurve op semi-logschaal een rechte lijn is. Het is zeer de vraag of die veronderstelling realistisch is, zeker in een extremer bereik.



Figuur 5-1: Waterstand Dieze tegen overschrijdingsfrequentie

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Tabel 5-1: Waterstanden bij verschillende overschrijdingsfrequenties

Overschrijdingsfrequentie (1/jaar)	Waterstand (m t.o.v. NAP)
10	3,64
150	5,05
1.000	6,06
10.000	7,25
100.000	8,44

5.3 Kosten dijkversterking

De kosten van de dijkversterking bestaan uit de aanlegkosten van het dijkprofiel en de contante waarde van de extra onderhoudskosten (het deel van de onderhoudskosten dat gerelateerd is aan de versterking). Bij de scenario's met extra maatregelen zijn tevens de kosten van deze maatregelen van belang. In de paragrafen 5.3.1 en 5.3.2 zijn de aangehouden profielen van respectievelijk de dijk en de maatregelen beschreven. In paragraaf 5.3.3 zijn de kosten berekend.

5.3.1 Aangehouden dijkprofielen

Voor het berekenen van de kosten van de dijkversterking zijn fictieve dijkprofielen gebruikt. Voor deze profielen is aangenomen dat bij een kleinere overstromingskans het profiel op twee aspecten wijzigt:

- een hogere kruinhoogte
- een flauwer binnentalud.

Kruinhoogte

Om de overstromingskans kleiner te maken moet de dijk een waterstand met een grotere terugkeertijd kunnen keren.

Op basis van de functie in Figuur 5-1 is de decimeringshoogte 1,2 m. De decimeringshoogte geeft aan hoeveel hoger de waterstand is bij een 10 keer grotere terugkeertijd. Dus de waterstand met een terugkeertijd van 1000 jaar is 1,2 m hoger dan de waterstand met een terugkeertijd van 100 jaar.

Aangenomen is dat de kans op overstroming gelijk is aan de kans op overloop. Dit betekent dat de overstromingskans direct en alleen afhankelijk is van de kruinhoogte. Dit betekent ook dat een kering die qua hoogte/overloop precies voldoet aan een bepaalde IPO-overschrijdingskansnorm een overstromingskans bezit die getalsmatig gelijk is aan de overschrijdingskansnorm.

Bij een overstromingskans van 1/10 per jaar ligt de kruinhoogte ongeveer 1,1 m hoger dan het maaiveld in het achterland en bij een overstromingskans van 1/100 per jaar ligt de kruinhoogte ongeveer 2,2m meter hoger.

Binnentalud

Bij een hogere norm moet de dijk aan een grotere vereiste stabiliteitsfactor voldoen. Hiervoor moet het binnentalud flauwer worden. Voor een dijk met een overstromingskans van 1/10 per jaar is aangenomen dat het binnentalud een helling van 1:3 moet hebben. Vervolgens is aangenomen dat het binnentalud bij een 10 keer kleinere overstromingskans 1:0,5 flauwer moet worden (1:3,5 bij een overstromingskans van 1/100 per jaar, 1:4,0 bij een overstromingskans van 1/1000 per jaar, etc.). Voor het dijkprofiel met een overstromingskans van 1/150 per jaar is aangenomen dat deze hetzelfde binnentalud heeft als een dijkprofiel met een overstromingskans van 1/100 per jaar.

Aangehouden dijkprofiel per overstromingskans

In tabel 5-2 is het aangehouden dijkprofiel per overstromingskans weergegeven. Voor het buitentalud en de kruinbreedte zijn vaste waarden aangehouden. De kruinhoogte en binnentalud zijn hierboven bepaald. De breedte van de dijk en het oppervlakte van de doorsnede zijn berekend op basis van de aangehouden waarden van het profiel.

Tabel 5-2: Aangehouden dijkprofiel per norm

Onderdeel	Overstromingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Buitentalud	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3
Kruinbreedte [m]	2	2	2	2	2
Kruinhoogte [m t.o.v. maaiveld]	1,1	2,3	3,5	4,7	5,9
Binnentalud	1:3	1:3,5	1:4	1:4,5	1:5
Breedte dijk [m]	8,6	17,0	26,5	37,3	49,2
Oppervlakte doorsnede [m ²]	5,8	21,8	49,9	92,2	151,0

5.3.2 Aangehouden profiel nieuwe kanteldijk

Bij de scenario's met een nieuwe kanteldijk wordt parallel aan de A59 aan beide zijden een permanente kering aangelegd. Voor deze kering zijn standaard profielen aangehouden. Aangenomen is dat het buitentalud, de kruinbreedte en het binnentalud voor elke overstromingskans gelijk is. De kruinhoogte bij het profiel met een normering van 1/10 is 1,5 m boven het maaiveld is gebaseerd op hoogtegegevens uit AHN3. Om een factor 10 kleinere overstromingskans te realiseren moet deze hoogte toe met 1,2 m toenemen en neemt dientengevolge ook de breedte van de dijk toe, net zoals bij het dijkprofiel in paragraaf 5.3.1. In tabel 5-3 is een overzicht gegeven van de aangehouden profielen voor de kanteldijk.

Tabel 5-3: Aangehouden profiel kanteldijk per norm

Onderdeel	Overstromingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Buitentalud	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3
Kruinbreedte [m]	2	2	2	2	2
Kruinhoogte [m t.o.v. maaiveld]	1,5	2,7	3,9	4,7	5,9
Binnentalud	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3
Breedte dijk [m]	11,0	18,2	25,4	30,2	37,4
Oppervlakte doorsnede [m ²]	9,8	27,3	53,4	75,7	116,2

5.3.3 Kosten

De kosten van een dijkversterking bestaan uit de initiële aanlegkosten en periodieke onderhoudskosten van het dijkprofiel en de eventuele maatregelen. Hieronder zijn eerst de kosten

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

voor het dijkprofiel en daarna voor de maatregelen gegeven. Vervolgens zijn de kosten van de dijkversterking van de verschillende scenario's bepaald.

In deze paragraaf worden steeds de totale onderhoudskosten genoemd. Voor de bepaling van de optimale overstromingskans is alleen het deel van de onderhoudskosten van belang dat afhankelijk is van de te realiseren overstromingskans. Als de onderhoudskosten bij elke overstromingskans even groot zijn, dan hebben ze geen invloed op de optimale overstromingskans. Ze zijn dan namelijk niet van invloed op de afgeleide van de totale kosten naar de overstromingskans (in het optimum is de afgeleide gelijk aan nul).

Kosten dijkprofiel

De aanlegkosten van het dijkprofiel bestaan uit de kosten voor grondaankoop en de kosten van dijkmateriaal. Voor deze kosten zijn de volgende eenheidsprijzen aangehouden:

- Leveren en verwerken dijkmateriaal €20,- per m³
- Aankoop grond €400,- per m².

De hoeveelheden dijkmateriaal dat benodigd is en grond dat aangekocht moet worden zijn afhankelijk van de dimensies van de waterkering. Voor deze dimensies zijn de profielen uit tabel 5-2 aangehouden.

De kosten zijn berekend ten opzichte van het bestaande dijkprofiel. Aangenomen wordt dat het bestaande dijkprofiel, na groot onderhoud, een overstromingskans bezit van 1/150 per jaar (dit is de overstromingskans volgens de achtergronden van de IPO-normering als de kering precies voldoet aan de IPO-norm). Bij een dijkprofiel met een kleinere overstromingskans is bepaald hoeveel extra grond aangekocht moet worden en hoeveel extra dijkmateriaal benodigd is ten opzichte van het dijkprofiel met een overstromingskans van 1/150 per jaar. Vervolgens zijn deze extra kosten opgeteld bij de aanlegkosten voor het profiel met een overstromingskans van 1/150 per jaar.

Voor het dijkprofiel met een overstromingskans van 1/150 per jaar en hoger is aangenomen dat de aanlegkosten gelijk zijn aan de onderhoudskosten van het grote onderhoud.

De berekening van de aanlegkosten van het dijkprofiel per overstromingskans is opgenomen in tabel 5-4.

Tabel 5-4: Aanlegkosten dijkprofiel

Onderdeel	Overstromingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Grondaankoop					
Grondaankoop [m ² /m]	0,0	0,0	9,6	20,3	32,3
Kosten grondaankoop [€/m]	0	0	3.820	8.120	12.900

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Onderdeel	Overstromingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Dijkmateriaal					
Hoeveelheid dijkmateriaal [m ³ /m]	0,0	0,0	28,1	70,4	129,2
Kosten dijkmateriaal [€/m]	0	0	562	1.409	2.585
Totale aanlegkosten					
Aanlegkosten dijkprofiel [€/m]	275	275	4.657	9.804	15.760

De onderhoudskosten van het dijkprofiel bestaan uit de kosten voor regulier beheer en onderhoud en de kosten voor groot onderhoud. Voor deze kosten zijn de volgende prijzen aangehouden:

- regulier beheer en onderhoud €10,- per strekkende meter per jaar.
- groot onderhoud €275,- per strekkende meter per keer.

De netto constante waarde (NCW) van de kosten van regulier beheer en onderhoud is berekend voor een oneindige periode. Aangenomen is dat het onderhoud jaarlijks wordt uitgevoerd. De NCW kan dan als volgt berekend worden:

$$NCW = \frac{I}{d}$$

Waarin:

NCW	Netto Constante Waarde	[€]
I	Kosten per jaar	[€]
d	Discontovoet (= 0,0225 conform standaarddiscontovoet Rijkswaterstaat 2021)	[-]

De netto constante waarde (NCW) van groot onderhoud is berekend voor een oneindige periode. Aangenomen is dat het groot onderhoud één keer in de 30 jaar wordt uitgevoerd. De NCW kan dan als volgt bepaald worden:

$$NCW = \frac{\frac{I}{(1+d)^T}}{1 - \frac{I}{(1+d)^T}}$$

Waarin:

NCW	Netto Constante Waarde	[€]
I	Kosten per terugkeertijd	[€]
T	Terugkeertijd van het onderhoud (= 30)	[jaar]
d	Discontovoet (= 0,0225)	[-]

In tabel 5-5 zijn de onderhoudskosten van het dijkprofiel per norm berekend. Deze kosten zijn voor elke overstromingskans gelijk. Ze zijn dus niet van invloed op de economisch optimale overstromingskans.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Tabel 5-5: Onderhoudskosten dijkprofiel

Onderdeel	Overstromingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Regulier beheer en onderhoud					
Kosten [€/m]	10	10	10	10	10
NCW kosten [€/m]	444	444	444	444	444
Groot onderhoud					
Kosten [€/m]	275	275	275	275	275
NCW kosten [€/m]	290	290	290	290	290
Totale onderhoudskosten					
Onderhoudskosten dijkprofiel [€/m]	734	734	734	734	734

In tabel 5-4 en tabel 5-5 zijn respectievelijk de aanlegkosten en de onderhoudskosten van het dijkprofiel per strekkende meter bepaald. Het gehele dijkvak heeft een lengte van ongeveer 4,5 km. De totale kosten zijn berekend in tabel 5-6.

Tabel 5-6: Totale kosten dijkprofiel

Onderdeel	Overschrijdingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Aanlegkosten [€/m]	275	275	4.657	9.804	15.760
Onderhoudskosten [€/m]	734	734	734	734	734
Totale kosten per meter [€/m]	734	1.009	5.391	10.538	16.494
Lengte dijk [m]	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500
Totale kosten [€]	4.540.964	4.540.964	24.258.389	47.421.014	74.223.239

Kosten kanteldijken

De kosten van de maatregelen bestaan uit de kosten voor grondaankoop en de kosten van dijk materiaal. Voor deze kosten zijn dezelfde eenheidsprijzen als bij het dijkprofiel aangehouden.

In de huidige situatie is er geen kering op de locatie van de maatregelen aanwezig en is ook de grond niet in het bezit van het waterschap. De grondaankoop betreft het volledige grondvlak van de dijk (lengte maal breedte van de dwarsprofielen) en het volume dijkmateriaal volgt uit het volume van de dijk (lengte maal het oppervlak van de dwarsprofielen). De profielen uit tabel 5-3 zijn aangehouden voor de berekening.

In tabel 5-7 is de berekening voor de aanlegkosten van de kanteldijken opgenomen.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Tabel 5-7: Aanlegkosten kanteldijken

Onderdeel	Overschrijdingskans van de te keren waterstand [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Grondaankoop					
Grondaankoop [m ² /m]	11,0	18,2	25,4	30,2	37,4
Kosten grondaankoop [€/m]	4.400	7.280	10.160	12.080	14.960
Dijkmateriaal					
Hoeveelheid dijkmateriaal [m ³ /m]	9,8	27,3	53,4	75,7	116,2
Kosten dijkmateriaal [€/m]	195	545	1.069	1.513	2.325
Totale aanlegkosten					
Aanlegkosten [€/m]	4.595	7.825	11.229	13.593	17.285

Aangenomen is dat de onderhoudskosten van de kanteldijken gelijk zijn aan de onderhoudskosten van het dijkprofiel. In de paragraaf over de kosten van het dijkprofiel zijn deze onderhoudskosten uitgewerkt. In tabel 5-8 is een overzicht voor de onderhoudskosten van de kanteldijken gegeven.

Tabel 5-8: Onderhoudskosten kanteldijken

Onderdeel	Overschrijdingskans van de te keren waterstand [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Regulier beheer en onderhoud					
Kosten [€/m]	10	10	10	10	10
NCW kosten [€/m]	444	444	444	444	444
Groot onderhoud					
Kosten [€/m]	275	275	275	275	275
NCW kosten [€/m]	290	290	290	290	290
Totale onderhoudskosten					
Onderhoudskosten [€/m]	734	734	734	734	734

In tabel 5-7 en tabel 5-8 zijn respectievelijk de aanlegkosten en onderhoudskosten van de kanteldijken per strekkende meter bepaald. De lengte van de kanteldijk is twee keer de afstand (beide zijden) van het spoor tot het punt waar de snelweg hoger ligt dan de waterstand bij norm. Deze lengte is daarom afhankelijk van de normering. De totale kosten zijn berekend in tabel 5-9.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Tabel 5-9: Totale kosten kanteldijken

Onderdeel	Overschrijdingskans van de te keren waterstand [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Aanlegkosten [€/m]	4.595	7.825	11.229	13.593	17.285
Onderhoudskosten [€/m]	734	734	734	734	734
Totale kosten per meter [€/m]	5.329	8.560	11.963	14.328	18.019
Lengte dijk [m]	800	960	1.140	1.200	1.400
Totale kosten [€]	4.263.282	8.217.123	13.637.482	17.193.004	25.226.184

Totale kosten

De MKBA wordt voor drie scenario's uitgevoerd, zoals beschreven in paragraaf 5.1. Bij het scenario 'Bres Noord' blijft de huidige situatie gehandhaafd, de kosten van dit scenario bestaan daarom alleen uit de kosten van het dijkprofiel. Bij de andere twee scenario's worden extra maatregelen genomen, de kosten van deze scenario's bestaan daarom uit de kosten van het dijkprofiel en de kosten van de maatregelen.

Aangenomen is dat de te keren waterstanden van de regionale kering langs de Dieze exact gelijk moeten zijn als die van de compartimenteringsdijken (de 'maatregelen'). Oftewel: er is aangenomen dat de overstromingskans van de regionale kering identiek is aan de overstromingskans van de compartimenteringsdijken. Dit vereenvoudigt de optimalisatie maar deze 'constraint' hoeft niet daadwerkelijk economisch optimaal te zijn. In tabel 5-10 zijn de totale kosten voor het scenario 'Bres Noord zonder maatregelen zonder dichting van de bres' berekend. En in tabel 5-11 zijn de kosten van de scenario's "Bres Noord met kanteldijken zonder dichting van de bres" en "Bres Noord met kanteldijken en bres dicht na 48 uur" berekend.

Tabel 5-10: Totale kosten scenario 'Bres Noord'

Onderdeel	Overstromingskans				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Kosten dijkprofiel [€]	3.303.464	4.540.964	24.258.389	47.421.014	74.223.239
Kosten maatregelen [€]	0	0	0	0	0
Totale kosten [€]	3.303.464	4.540.964	24.258.389	47.421.014	74.223.239

Tabel 5-11: Totale kosten scenario 'Bres Noord met kanteldijk'

Onderdeel	Overstromingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Kosten dijkprofiel [€]	3.303.464	4.540.964	24.258.389	47.421.014	74.223.239

Onderdeel	Overstromingskans [1/jaar]				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Kosten maatregelen [€]	4.263.282	8.217.123	13.637.482	17.193.004	25.226.184
Totale kosten [€]	7.566.746	12.758.087	37.895.870	64.614.018	99.449.423

5.4 Overstromingsrisico

De baten van een dijkversterking bestaan uit het gereduceerde overstromingsrisico van het achterland. Het overstromingsrisico bestaat uit de kans op een overstroming maal de gevolgen van deze overstroming. Voor de gevolgen van de overstroming is alleen de directe financiële schade zoals berekend met SSM2017 meegenomen.

De schade als gevolg van een overstroming is berekend in hoofdstuk 3.2. In dit hoofdstuk is de materiële schade berekend bij een overstroming met een terugkeertijd van 150 jaar. Voor de MKBA zijn enkele aanvullende SOBEK- en SSM berekeningen gemaakt voor terugkeertijden van 10 en 1.000 jaar, waarbij de waterstanden zoals berekend in paragraaf 5.2 zijn gebruikt.

Daarnaast is ook het overstromingsrisico bij een overstroming met een terugkeertijd van 10.000 jaar en 100.000 jaar meegenomen. Hiervoor zijn geen SOBEK- en SSM berekeningen gemaakt, maar is de schade gebaseerd op de berekeningen bij een terugkeertijd van 1.000 jaar. Om deze schades te bepalen is in eerste instantie gekeken wat de gemiddelde waterdiepte in het overstroomde gebied bij de overstroming met een terugkeertijd van 1.000 jaar is. Vervolgens is in figuur 4.1 t/m figuur 4.6 uit de "Standaardmethode 2017 Schade en slachtoffers van overstromingen" (Deltares, april 2017) afgelezen wat de schadefactor van de verschillende functies bij deze waterstand is. Hierna is gekeken hoeveel hoger de waterstand is bij een overstroming met terugkeertijd van 10.000 en 100.000 jaar en ook de schadefactor bij deze waterstanden afgelezen. Vervolgens is de schade van een functie bij een overstroming met terugkeertijd van 1.000 jaar verhoogd met de verhouding van de schadefactor bij de grotere overstroming en de schadefactor bij de overstroming met terugkeertijd van 1.000 jaar.

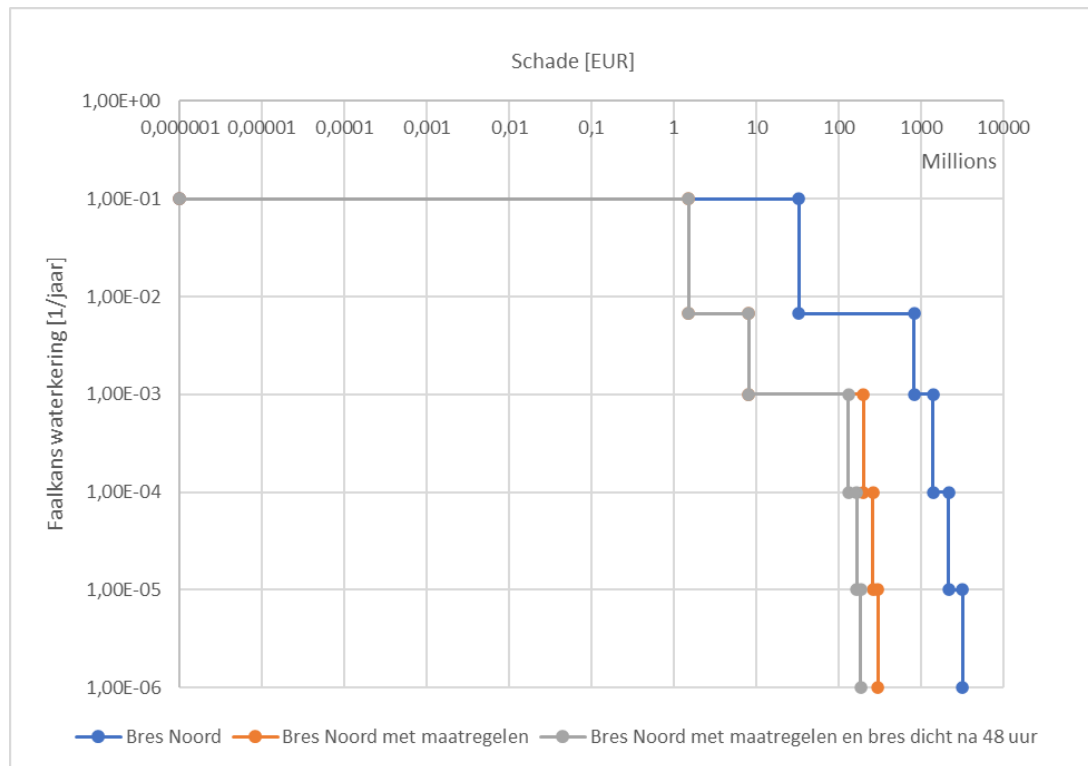
In tabel 5-12 is het overzicht gegeven van de schade bij overstroming per overschrijdingskans van de waterstand in geval van een overstroming van de verschillende scenario's. Bedacht moet worden dat een dijk met een overstromingskans van 1/100 per jaar ook kan falen bij een waterstand met een overschrijdingskans van 1/100.000 per jaar. Bij een dijk met een overstromingskans van 1/100 per jaar zijn dus ook grotere schades mogelijk dan de schade bij een 1/100-jaar waterstand.

Tabel 5-12: Schade per overstromingskans

Scenario	Schade per waterstand met een bepaalde jaarlijkse overstromingskans				
	1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Bres Noord zonder maatregelen zonder dichting van de bres	€ 33.000.000	€ 820.000.000	€ 1.400.000.000	€ 2.150.000.000	€ 3.200.000.000
Bres Noord met kanteldijk zonder dichting van de bres	€ 1.500.000	€ 8.100.000	€ 200.000.000	€ 260.000.000	€ 300.000.000
Bres Noord met kanteldijk en bres dicht na 48 uur	€ 1.500.000	€ 8.100.000	€ 130.000.000	€ 165.000.000	€ 185.000.000

De gegevens uit tabel 5-12 kunnen ook in een FS-curve weergegeven worden. In deze FS-curve wordt de schade bij een bepaalde waterstand tegen de kans op overschrijding van die waterstand weergegeven. In figuur 5-2 is de FS-curve van de verschillende scenario's van de dijk weergegeven.

Zoals eerder is aangegeven, is aangenomen dat de overstromingskans gelijk is aan de kans op overloop. Het overstromingsrisico bij een bepaalde overstromingskans kan daarom bepaald worden door het oppervlak onder de FS-curve te nemen vanaf de overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de overstromingskans. In tabel 5-13 is een overzicht gegeven van het berekende risico per overstromingskans en per scenario.



Figuur 5-2: FS-curve voor de schade optredend bij verschillende scenario's (de getoonde curve hoort bij de situatie waarin de overstromingskans gelijk is aan 1/10 per jaar)

Het risico dat berekend is op basis van het oppervlak onder de FS-curve is het risico in het eerste jaar na de dijkversterking. Voor de MKBA is het risico voor een oneindige periode relevant. Deze netto constante waarde (NCW) van het risico kan als volgt bepaald worden:

$$NCW_{risico} = \frac{R}{d}$$

Waarin:

NCW _{risico}	Netto Constante Waarde van het risico	[€]
R	Jaarlijkse risico	[€/jaar]
d	Discontovoet (= 0,0225 conform standaard discontovoet Rijkswaterstaat 2021)	[per jaar]

In tabel 5-13 zijn het jaarlijkse risico en de NCW van het risico weergegeven voor verschillende overstromingskansen, voor de verschillende scenario's van de dijk.

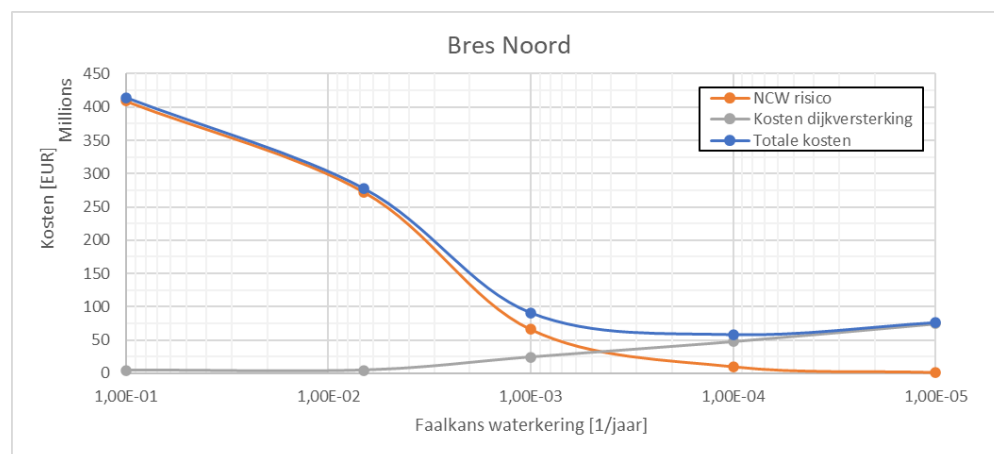
Tabel 5-13: Risico per overstromingskans

Scenario	Onderdeel	Overstromingskans [per jaar]				
		1/10	1/150	1/1.000	1/10.000	1/100.000
Bres Noord zonder maatregelen, zonder dichting van een bres	Risico [€]	9.212.167	6.132.167	1.485.500	225.500	32.000
	NCW Risico [€]	409.429.630	272.540.741	66.022.222	10.022.222	1.422.222
Bres Noord met Maatregelen, zonder dichting van een bres	Risico [€]	392.300	252.300	206.400	26.400	3.000
	NCW Risico [€]	17.435.556	11.213.333	9.173.333	1.173.333	133.333
Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur	Risico [€]	319.600	179.600	133.700	16.700	1.850
	NCW Risico [€]	14.204.444	7.982.222	5.942.222	742.222	82.222

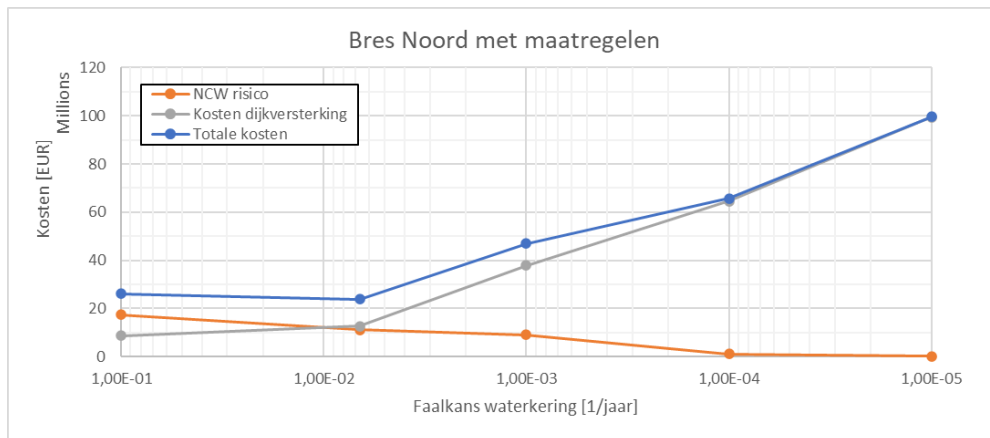
5.5 Optimale ontwerpnorm

De optimale ontwerpnorm wordt gevonden waar de som van de contante waarde van de aanlegkosten en het risico minimaal is.

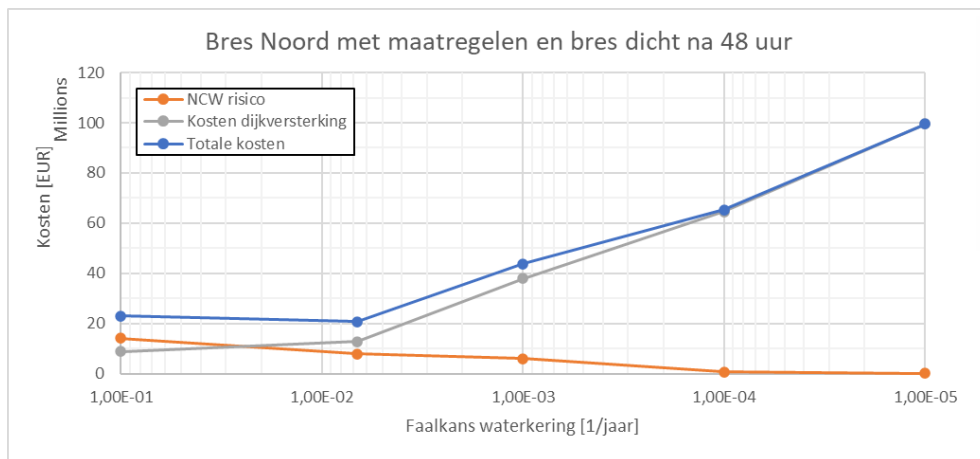
De kosten uit tabel 5-10 en tabel 5-11 zijn opgeteld bij het risico uit tabel 5-13 om tot de totale kosten te komen. In figuur 5-3, figuur 5-4 en figuur 5-5 zijn de kosten, het risico en de totale kosten uitgezet tegen de overstromingskans van de waterkering. De optimale ontwerpnorm van ieder scenario is weergegeven in tabel 5-13.



Figuur 5-3: Optimale ontwerpnorm bij scenario 1: Bres Noord



Figuur 5-4: Optimale ontwerpnorm bij scenario 4: Bres Noord met kanteldijk



Figuur 5-5: Optimale ontwerpnorm bij scenario 5: Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur

Tabel 5-14: Optimale overstroomingskans (ontwerpnorm) per scenario

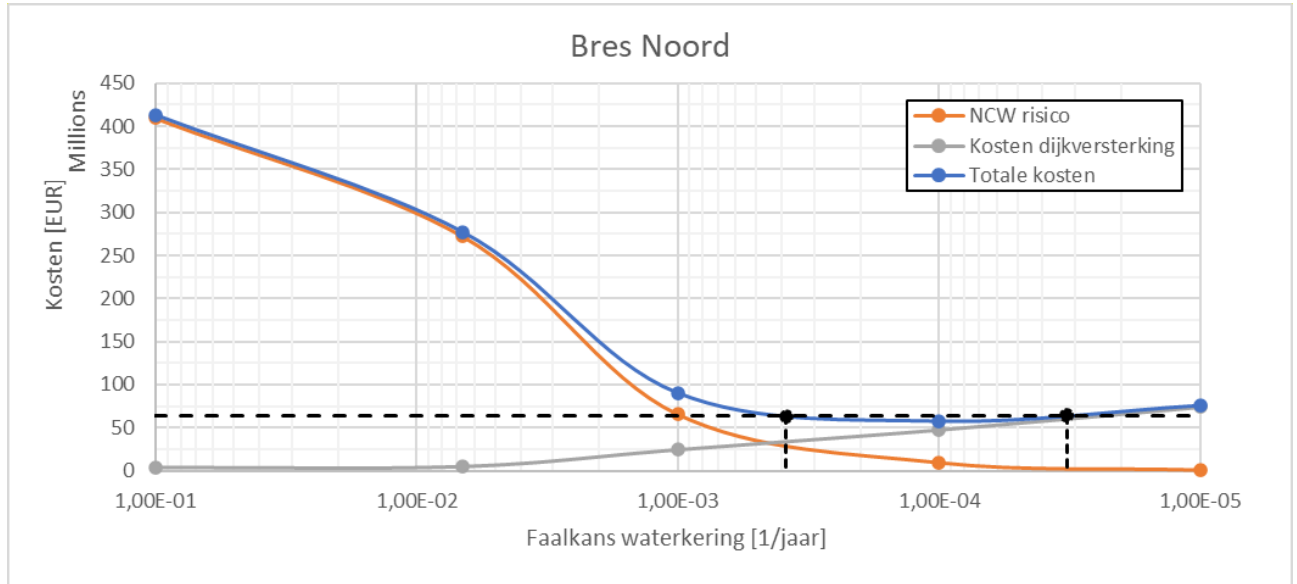
Scenario	Optimale overstroomingskans [per jaar]
Bres Noord	Ca. 1/10.000 ^{*1}
Bres Noord met maatregelen	Ca. 1/150
Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur	Ca. 1/150

*1 Deze norm is uitzonderlijk hoog voor een regionale kering, en wordt in deze kosten-baten analyse berekend door de bijzondere combinatie van de hoge schade en het korte dijkvak dat het gebied beschermd

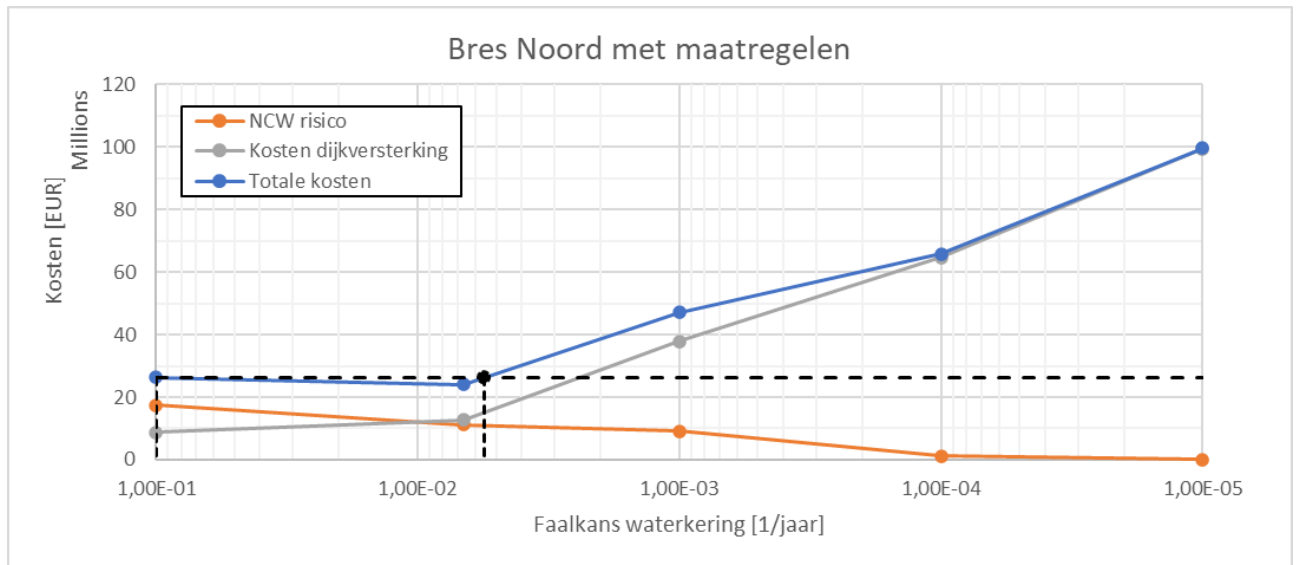
Gevoeligheid optimale ontwerpnorm

Bij alle drie de scenario's loopt de lijn van de totale kosten vlak rondom de optimale ontwerpnorm. Hierdoor is de optimale ontwerpnorm zeer gevoelig voor onzekerheden in de totaalkosten.

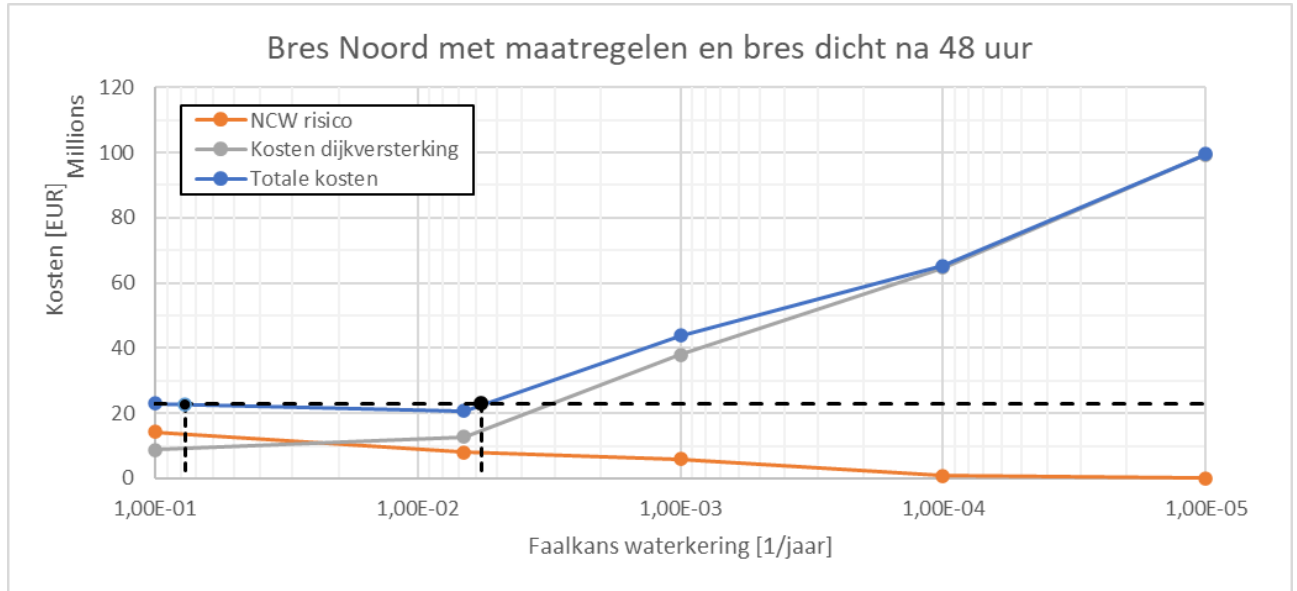
Om een beeld te krijgen van de gevoeligheid van de optimale ontwerpnorm is bepaald wat de bandbreedte is van de optimale ontwerpnorm bij een verhoging van 10% van de optimale totaalkosten. In figuur 5-6, figuur 5-7 en figuur 5-8 is deze bandbreedte weergegeven voor de drie scenario's. De boven- en ondergrens van de bandbreedte van de optimale ontwerpnorm zijn weergegeven in tabel 5-15.



Figuur 5-6: Bandbreedte optimale ontwerpnorm bij 10% marge op totale kosten bij scenario 1: Bres Noord



Figuur 5-7: Bandbreedte optimale ontwerpnorm bij 10% marge op totale kosten bij scenario 4: Bres Noord met maatregelen



Figuur 5-8: Bandbreedte optimale ontwerpnorm bij 10% marge op totale kosten bij scenario 5: Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur

Tabel 5-15: Optimale ontwerpnorm met bandbreedte per scenario

Scenario	Optimale ontwerpnorm	Ondergrens optimale ontwerpnorm	Bovengrens optimale ontwerpnorm
Bres Noord	1/10.000	1/32.000	1/2.500
Bres Noord met maatregelen	1/150	1/180	1/10
Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur	1/150	1/175	1/13

5.6 Optimale toetsnorm

De optimale ontwerpnorm is van belang op het moment dat eenmaal is besloten tot versterken. Voor de optimale optimale norm zijn de vaste kosten daarom niet meer van belang en zijn alleen de variabele kosten van belang. Dat ligt anders als wordt gekeken naar de vraag of versterking doelmatig is. Dan zijn de vaste kosten wel van belang. Daarom is een economisch optimale toetsnorm ook niet gelijk aan een economisch optimale ontwerpnorm.

De optimale toetsnorm is de maximaal toelaatbare faalkans die vanuit economisch perspectief nog net acceptabel is. Indien de faalkans van de waterkering groter wordt dan deze maximaal toelaatbare faalkans loont het om te gaan versterken. De optimale toetsnorm ligt op het punt waar de contante waarde van de afname van het risico bij versterking tot de economisch optimale overstromingskans gelijk is aan de contante waarde van de versterkingskosten (vaste + variabele kosten).

De economisch optimale overstromingskans na versterking is bepaald in paragraaf 5.5. Als de optimale toetsnorm en de optimale ontwerpnorm ver uiteen liggen, dan kan bij het bepalen van de optimale toetsnorm bij goede benadering worden verondersteld dat de overstromingskans na versterking gelijk is aan nul. De *afname* van het overstromingskans is dan namelijk vrijwel gelijk aan het *aanvankelijke* overstromingskans. Ter illustratie: als de overstromingskans voor versterking 1/100 is en na versterking 1/1000, dan is de afname van de overstromingskans bij goede benadering gelijk aan 1/100 (de exacte uitkomst is uiteraard $1/100 - 1/1000 = 9/1000$).

De economisch optimale overstromingskans volgt nu uit:

$$P_{toets} = \frac{NCW_{investering}}{S} * d$$

Waarin:

P_{toets}	Toetsnorm [EUR]
$NCW_{investering}$	Netto Constante Waarde van de investering [EUR]
S	Schade [EUR]
d	Discontovoet (= 0,0225 conform standaard discontovoet Rijkswaterstaat 2021) [-]

De $NCW_{investering}$ is gelijk aan de totale kosten voor een waterkering met een overstromingskans gelijk aan de optimale ontwerpnorm. De onderhoudskosten zijn hierbij niet meegenomen omdat die los staan van de dijkversterking: zonder dijkversterking zijn deze kosten hetzelfde. De totale kosten van de waterkering met de optimale ontwerpnorm (1/10.000) van het scenario 'Bres Noord' zijn € 47.421.014 (zie tabel 5-6). De totale kosten van de waterkering en de maatregelen met de optimale ontwerpnorm (1/150) van de scenario's met maatregelen zijn € 12.758.087 (zie tabel 5-9). Dit leidt tot een optimale toetsnorm zoals is weergegeven in Tabel 5-16

Tabel 5-16: Optimale toetsnorm per scenario

Scenario	Optimale toetsnorm (overstromingskans) [per jaar]
Bres Noord zonder maatregelen, zonder dichting van een bres	1/2.000
Bres Noord met maatregelen, zonder dichting van een bres	1/30
Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur	1/30

5.7 Conclusies/discussie

Op basis van de maatschappelijke kosten-baten analyse is een optimale ontwerpnorm en een optimale toetsnorm voor drie scenario's bepaald. De optimale ontwerpnorm is gelijk aan de faalkans van de waterkering waar de som van de kosten van een dijkversterking en het overstromingsrisico het laagst is. De optimale toetsnorm wordt gevonden waar de totale investeringskosten (vaste+variabele kosten van versterking) lager zijn dan de risico zonder versterking.

Bij het scenario Bres Noord is de optimale ontwerpnorm 1/10.000 en de optimale toetsnorm 1/2.000. Voor een regionale kering lijkt dit erg hoog, echter gezien de grote berekende schade bij een overstroming, en relatief beperkte investeringskosten voor een versterking, valt dit goed te verklaren. Bij het scenario Bres Noord met maatregelen en bij het scenario Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur is de optimale ontwerpnorm 1/150⁵. De optimale toetsnorm bij het scenario Bres Noord met maatregelen en bij het scenario Bres Noord met maatregelen en bres dicht na 48 uur is orde 1/30 per jaar.

De totale kosten voor het versterken van het gehele dijkvak naar een overstromingskans van 1/10.000 liggen naar schatting in de orde van 47 miljoen euro. De totale investeringskosten voor het nemen van de maatregelen (waarbij huidige norm van de kering gehandhaafd blijft) worden ingeschat op ca. 12 miljoen euro. Op basis hiervan zou het dus lonen om een permanente maatregel (in de vorm van een compartimenteringskering/kanteldijk rondom de tunnel van de A59) aan te brengen. Hiermee nemen de gevolgen van een overstroming zodanig af dat verder versterken van de kering (op basis van deze MKBA) niet nodig is.

Bij bovenstaande moet worden opgemerkt dat bij de inschatting van zowel de kosten als de schade diverse grove aannames zijn gedaan. Hetzelfde geldt voor de gebruikte watrestandstatistiek en de veronderstelling dat de potentiële schade en de overstromingskans in

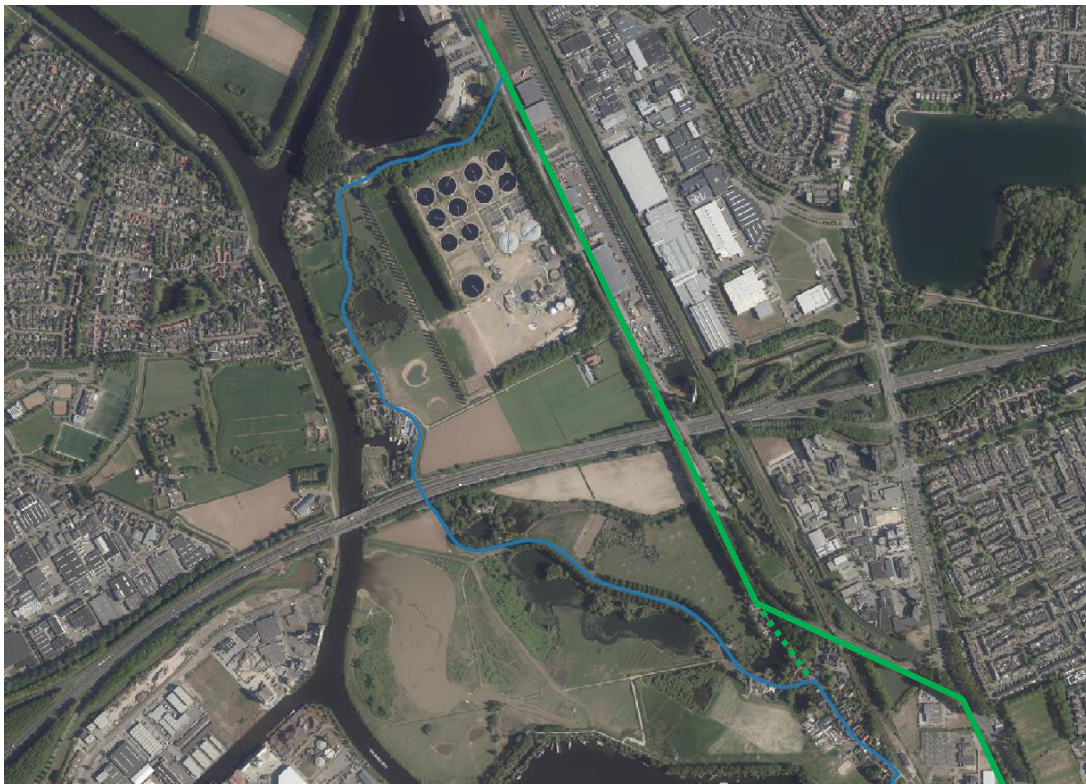
⁵ Deze ontwerpnorm staat los van de huidige norm, die toevallig ook 1/150 per jaar is. Hierbij wordt opgemerkt dat de huidige norm een overschrijdingskans van de waterstand is, terwijl de in dit hoofdstuk genoemde normen overstromingskansen betreffen. Zoals toegelicht in paragraaf 3.3 kan de overschrijdingskans van 1/150 per jaar ruwweg worden gelijkgesteld aan een overstromingskans van 1/750 per jaar.

de tijd constant blijven. Het is daarom aanneemlijk dat een gedetailleerdere analyse tot een andere optimale ontwerp- en toetsnormen leidt.

6 Maatgevende eisen medegebruik

Regionale keringen kennen veelal een intensief medegebruik, zoals verkeersweg en traject voor diverse kabels en leidingen. Uit oogpunt van schade aan deze functies is het frequent optreden van grote vervormingen van de kering onwenselijk, evenals de bijbehorende kosten voor het herstel en de (negatieve) beeldvorming over de staat van de keringen. Daarom wordt in dit hoofdstuk onderzocht welke eisen het medegebruik stelt aan met name de stabiliteit/vervorming van de waterkering, en in welke situaties deze eisen maatgevend kunnen zijn.

In een vroeg stadium van dit onderzoek is geconcludeerd dat deze onderzoeksvraag in deze pilot minder relevant is dan voor de andere pilots. Daarom is in samenspraak met STOWA in dit onderzoek gefocust op de andere onderzoeksvragen en wordt hier volstaan met een korte kwalitatieve beschouwing.



Figuur 6-1: Bovenaanzicht van het dijkvak, met de waterkering in blauw en de doorgaande weg (Treurenburg) in groen

Belangrijke nevenfuncties die een waterkering kan hebben zijn die van verkeersweg en traject voor kabels en leidingen. De dijk is over de gehele lengte voorzien van een asfaltweg (de Engelsedijk/Engelseweg/Gemaalweg). Zoals te zien in Figuur 6-1 is er door het gebied achter de kering een doorgaande weg aanwezig, die aan beide zijden op de waterkering aansluit. De weg over de kering vervult daarom slechts een zeer lokale bestemmingsfunctie, langs de weg zijn slechts enkele woningen en een kleine jachthaven aanwezig (toegang tot de rioolwaterzuiveringsinstallatie vindt plaats vanaf de doorgaande weg). Ook andere nevenfuncties, zoals bv. als landhoofd voor bruggen, zijn hier niet van toepassing. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de nevenfuncties van de dijk beperkt zijn. Mogelijke eisen die voortkomen uit de nevenfuncties zullen, ook gezien vanwege de enorme schade die optreedt bij een overstroming, vrijwel zeker minder streng zijn de eisen t.a.v. waterveiligheid.

Dit neemt niet weg dat het onwenselijk kan zijn dat het optreden van afschuivingen/vervormingen onwenselijk kan zijn, bijvoorbeeld wegens negatieve beeldvorming over de staat van de waterkeringen. De dijk heeft in het verleden regelmatig waterstanden gekeerd die aanzienlijk hoger zijn dan de dagelijkse waterstand (zie paragraaf 5.2). Voor zover bekend zijn hierbij geen schades opgetreden, ook geen kleine afschuivingen zonder doorbraak. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de kans op optreden van vervormingen niet zodanig is dat dit een probleem veroorzaakt voor de nevenfuncties of het imago van het waterschap.

7 Relatie tussen overstromingskans en eisen aan de waterkering

7.1 Inleiding

Op basis van de maatschappelijke kosten-baten analyse is in hoofdstuk 5.5 een optimale ontwerpnorm en toetsnorm voor het dijkvak bepaald. Uit dit hoofdstuk volgt een optimale toetsnorm van 1/2.000⁶. Daarnaast is ook de optimale ontwerpnorm bepaald uitgaande van het treffen van maatregelen zoals opgenomen in hoofdstuk 4, hiervoor wordt een norm van 1/150 gevonden.

In dit hoofdstuk is gekeken hoe de overstromingskans benaderd kan worden en hoe dat zich verhoudt tot de eisen aan de waterkering. Daarbij wordt uitgegaan van de optimale ontwerpnorm als eis aan de waterkering. Voor het bepalen van de overstromingskans worden in dit hoofdstuk twee toetsmethodes beschouwd, namelijk:

- Een probabilistische toetsmethode (§7.3)
- Een methode gebaseerd op basisfaalkansen en likelihood ratios (§7.4)

In paragraaf 7.2 is de beschikbare informatie vanuit eerdere toetsingen van het dijkvak gepresenteerd. Op basis van deze informatie is in paragraaf 7.3 een probabilistische benadering voor zo ver mogelijk uitgewerkt om tot een faalkans van het dijkvak te komen. In paragraaf 7.4 is een beschouwing gegeven de methode 'basisfaalkansen en likelihood ratio's. Deze methode bestaat nog niet (althans niet in Nederland) en kort is beschouwd hoe zo'n methode toegepast zou kunnen worden.

Doel van dit hoofdstuk is expliciet niet het komen tot een toetsoordeel voor het beschouwde dijkvak, maar om te onderzoeken hoe werkbaar deze methodes kunnen zijn voor het toetsen van regionale keringen.

7.2 Beschikbare informatie

Door het waterschap Aa en Maas zijn gegevens van de dijk van de 1^{ste} en 2^{de} toetsing aangeleverd. In 2012/2013 zijn de regionale waterkeringen van de waterschappen Aa en Maas, Brabantse Delta en de Dommel voor het eerst beoordeeld. Na de 1e toetsing zijn delen van het dijkvak tussen 2015 en 2016 versterkt en is een ontwerprapport opgesteld (lv-Infra, 23-2-2015). In de versterking van 2015/2016 zijn dijkvak R_a_II_a, dijkvak R_a_I_a en dijkvak R_a_II versterkt op een veiligheidsnorm passend bij IPO-klasse V (waterstand met een overschrijdingskans van 1/1000). Dit is een hogere veiligheidseis dan het hoeft te zijn, de waterkering zit tussen IPO-klasse II en IV (bij een waterstand met een overschrijdingskans 1/150). Uit de afweging van de kosten

⁶ In de conceptversie van de MKBA werd een norm van 1/1.495 gevonden, in de herziene versie is dit 1/2.000 geworden. Vanwege het relatief kleine verschil en het feit dat het doel van deze pilot het testen van een methode is (en niet het vinden van accurate resultaten voor het pilot gebied) zijn de berekeningen in dit hoofdstuk hier niet meer op aangepast, en is de beoordeling uitgevoerd op basis van de toetsnorm van 1/1.495 per jaar.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

van een dijkversterking op een veiligheidsnorm van 1/150 en 1/1000 bleek het voordelig te zijn de dijk te versterken op een veiligheidsnorm van 1/1000 en is dit zo meegenomen in het ontwerp

In 2017 is de tweede toetsronde gestart, die aanvullend is op de eerste ronde (Antea, 5 augustus 2019). Bij de eerste uitgevoerde beoordeling in 2012/2013 is beoordeeld op vier

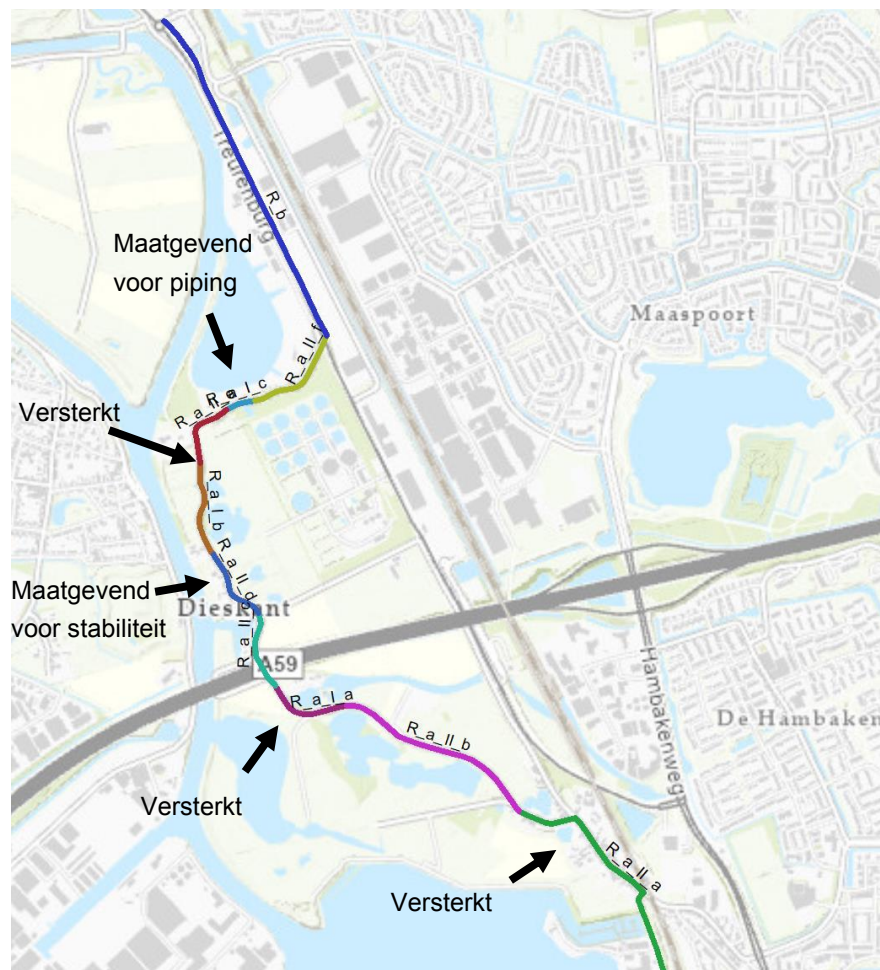
faalmechanismen, namelijk:

- overlopen/overslag (HT);
- macrostabiliteit binnenwaarts (STBI);
- macrostabiliteit buitenwaarts (STBU);
- piping/heave (STPH).

In de tweede toetsronde zijn aanscherpingen op de eerste toetsronde uitgevoerd:

- Dijkvakken die in de eerste toetsronde enkel op basis van het beheerdersoordeel zijn afgekeurd zijn herzien;
- Een herbeoordeling is uitgevoerd voor faalmechanismen waarvoor de rekenregels dusdanig gewijzigd zijn.

In figuur 7-1 zijn de dijkvakken in kaart weergegeven die zijn gehanteerd in de toetsing.



Figuur 7-1: Vakindeling 2^e toetsronde

Uit de toetsingen volgt voor de vakken die niet versterkt zijn dat vak R_a_II_d het laagst scoort op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, en vak R_a_I_c op piping.

7.3 Probabilistische toetsmethode

In de onderstaande parafen is de probabilistische toets zo ver mogelijk uitgewerkt op basis van de beschikbare informatie uit oude toetsingen (zie paragraaf 7.2) Allereerst is beschouwd welke mechanismes relevant zijn en geschikt voor een probabilistische benadering. Vervolgens is per relevant mechanisme het zwakste vak middels een probabilistische benadering beschouwd. Immers domineert de faalkans van het zwakste vak de faalkans van op het mechanisme. Als laatste is gekeken hoe deze benadering zich naar een faalkans van het gehele dijktraject vertaalt.

7.3.1 Beschouwde faalmechanismen

In deze pilot worden de faalmechanismen Hoogte (HT), Macrostabiliteit Binnenwaarts (STBI) en Piping (STPH) beschouwd. Voor de overige faalmechanismen geldt dat hiervoor onvoldoende gegevens beschikbaar waren, of dat deze niet geschikt zijn voor een probabilistische benadering.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

7.3.2 Hoogte (HT)

Voor de hoogtetoets kan gebruik gemaakt worden van PROMOTOR. PROMOTOR is een probabilistisch model voor het berekenen van toets- of ontwerphoogten van regionale keringen. Het model berekent de hydraulische belasting voor een groot aantal combinaties van het boezempeil en windcondities (richting en snelheid). De opgegeven boezempeil- en windstatistiek worden vervolgens gecombineerd om het hydraulisch belastingniveau (HBN) te bepalen bij een opgegeven terugkeertijd. Ook kan op basis van de aanwezige kruinhoogte het overslagdebiet berekend worden bij de normfrequentie. Door het berekende overslagdebiet te vergelijken met het kritieke overslagdebiet kan op probabilistische wijze de faalkans per toetsvak bepaald worden.

Voor de berekeningen is het van belang dat de locatie, waterdiepte, dwarsprofiel, taludhelling, ruwheid en aanwezigheid van golfreducerende elementen bekend zijn. In de PROMOTOR-berekening moeten daarnaast uitvoerlocaties voor de berekening van de hydraulische randvoorwaarden beschikbaar zijn, alsmede een shape-bestand van het buitenwater om de effectieve strijklengte te berekenen. Omdat veel van bovenstaande gegevens voor het pilotgebied niet beschikbaar waren (in eerdere toetsingen zijn golfhoogtes, waterstanden etc. deterministisch bepaald) kon voor deze pilot geen probabilistische beoordeling van de hoogte worden uitgevoerd.

7.3.3 Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)

7.3.3.1 Stap 1 Basisberekening STBI

De toetsing op stabiliteit binnenwaarts is niet opgenomen in de tweede toetsronde van 2019. Dit met de reden omdat de vakken allen op stabiliteit voldeden. De dijk is namelijk recent nog versterkt.

In tabel 7-1 zijn de resultaten van de stabiliteitsanalyses die volgden uit de nadere veiligheidsanalyse van december 2014 gegeven (Iv-Infra, 2014). De vakken die niet voldeden aan de stabiliteitseis gesteld bij een overschrijdingsfrequentie van 1/1000 (IPO-norm V).

Tabel 7-1: Resultaten stabiliteitsberekeningen nadere veiligheidsanalyse van december 2014 (Iv-Infra, 2014))

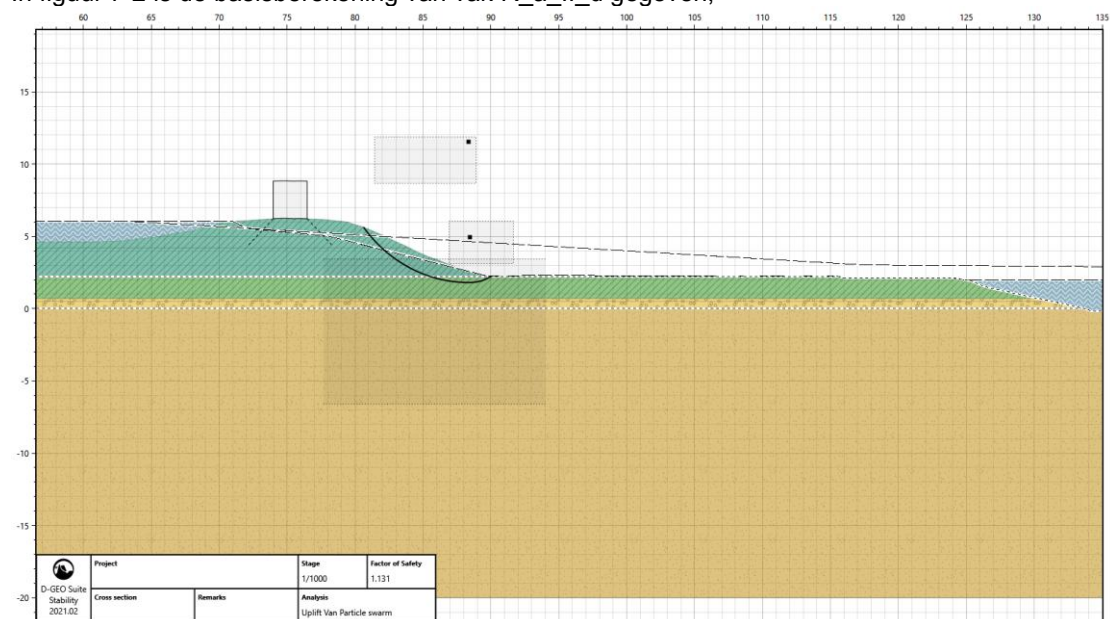
Vak	Lengte vak [m]	Factor of Safety, Uplift-Van	Versterkt
R_a_II_a	793	0,93	✓
R_a_II_b	671	1,21	
R_a_I_a	275	1,06	✓
R_a_II_c	255	1,55	
R_a_II_d	248	1,12	
R_a_I_b	309	1,24	
R_a_II_e	229	1,04	✓
R_a_I_c	98	1,53	
R_a_II_f	334	1,38	

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Het vak met de laagste stabiliteit die niet in de versterking is meegenomen is vak R_a_II_d en is dikbedrukt in tabel 7-1 opgenomen. Het volgende vak met de 1 na laagste stabiliteit is vak R_a_II_b.

Voor vak R_a_II_d is eerst een basissom (zie figuur 7-2) opgesteld en vervolgens een probabilistische berekening uitgevoerd. Bij de uitvoering van de berekening zijn de stappen gevolgd die zijn beschreven in de handreiking Faalkansanalyse Macrostabiliteit (Deltares, 2017). Indien uit de probabilistische berekening van vak R_a_II_d een hoge faalkans volgt, is wordt het volgende vak R_a_II_b berekend. Hierbij gaan we uit van het zwakste schakel principe. Indien de faalkansbijdrage van vak Ra_II_b te verwaarlozen is op de berekende faalkansbijdrage van R_a_II_d, is een verdere analyse niet de moeite waard. Hierbij zal de faalkans van de zwakste schakel domineren en de faalkans van het desbetreffende faalmechanisme bepalen.

In figuur 7-2 is de basisberekening van vak R_a_II_d gegeven,



Figuur 7-2: Basissom vak R_a_II_d

De berekende stabiliteitsfactor van vak R_a_II_d is 1,113. Dit is nagenoeg hetzelfde als de stabiliteitsfactor van de toetsing (1,12). Doordat de software vernieuwd is zijn er enkele verschillen tussen de twee sommen: o.a. verloop waterspanningen en het zoekmechanisme Uplift-Vanmodel. Er is getracht de nieuwe som zo veel mogelijk aan te laten sluiten bij het origineel.

7.3.3.2 Stap 2 Gevoeligheidsanalyse STBI

Om te bepalen welke invoerparameters significante invloed hebben op de stabiliteitsfactor van het dijklichaam en welke parameters als stochast dienen te worden ingevoerd worden gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze gevoeligheidsanalyses vormen een onderdeel van het beschreven stappenplan in de Handreiking Faalkansanalyse Macrostabiliteit. Hierbij wordt telkens één parameter gevarieerd. De parameters die gevarieerd worden zijn:

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

- Buitenwaterstand en freatische lijn
- Hoek van inwendige wrijving van dijksmateriaal, klei en zand
- Verkeersbelasting

Van overige parameters, waaronder bijvoorbeeld deklaagdikte en volumiek gewicht, wordt geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hiervoor is gekozen omwille van twee redenen:

1. Het is niet mogelijk om deze parameters als stochast in te voeren in D-Stability
2. Er zijn geen gegevens beschikbaar (grond- of labonderzoek) om van deze parameters betrouwbare stochasten te maken.

Van deze en overige parameters wordt daarom de deterministische waarde uit de toetsing gebruikt.

7.3.3.2.1 Rekenwaarden hoek van inwendige wrijving

De rekenwaarden van de hoek van inwendige wrijving van klei en zand zijn na bestudering van de aangeleverde resultaten van de triaxiaal- en DSS-proeven uit 2013/2014 aangepast. Ten eerste is de materiaalfactor van 1,15 verwijderd, aangezien deze niet meer nodig is in de probabilistische analyse. De rekenwaarde is daarom gelijk aan de karakteristieke waarde. De rekenwaarde voor de hoek van inwendige wrijving is in deze nieuwe analyse veranderd ten opzichte van de toetsing, zie tabel 7-2. Het verschil is te verklaren doordat de trendlijn in de sigma-tau grafieken in deze analyse is aangepast na toevoeging van extra labonderzoek.

Tabel 7-2 Hoek van inwendige wrijving, waarden toetsing en nieuwe waarden

Materiaal	Gemiddelde, toetsing	Karakteristiek, toetsing	Rekenwaarde, toetsing	Gemiddelde, nieuw	Rekenwaarde, nieuw
Klei	31,0	29,6	25,7	31,0	30,0
Zand	43,7	36,7	31,9	43,7	36,0

7.3.3.2.2 Resultaten

De resultaten van de gevoeligheidsberekeningen staan genoteerd in onderstaande tabel.

Tabel 7-3 Resultaten gevoeligheidsanalyse

#	Analyse	Buitenwaterstand	Verkeersbelasting	Stabiliteitsfactor
1	Rekenwaarden	1/150: NAP 5.05 m	13 kPA	1,334
2	Gemiddelde waarden	1/150: NAP 5.05 m	13 kPA	1,389
3	Rekenwaarden	1/150: NAP: 2.44 m	13 kPa	1,531
4	Rekenwaarden	1/150: NAP 5.05 m	-	1,334

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de stabiliteitsfactor het meest wordt beïnvloed door de buitenwaterstand en daarna door de sterkteparameters. De aanwezigheid van verkeersbelasting heeft geen invloed op de stabiliteit omdat de maatgevende glijcirkel hier niet doorheen gaat.

7.3.3.2.3 Toets glijcirkel bij verschillende waterstanden

In de User's Manual van D-Stability wordt verondersteld dat de kritieke glijcirkel bepaald met rekenwaarden van sterkte en belasting overeenkomt met de glijcirkel met de hoogste faalkans. Deze glijcirkel bepaald met de deterministische rekenwaarden wordt vervolgens in de probabilistische berekening vastgezet zodat niet alle mogelijke glijcirkels hoeven te worden beschouwd. Echter hoeft een kritieke glijcirkel in een semi-probabilistische som niet altijd maatgevend te zijn als het om faalkans gaat, omdat er andere onzekerheden een rol spelen. Om deze reden worden alle mogelijke glijcirkels doorgerekend: glijcirkels geforceerd door het dijkmateriaal, de kleilaag en het zandpakket bij verschillende waterstanden. Uit deze analyse volgt dat voor dijkvak R_a_II_d de maatgevende glijcirkels voor de semi-probabilistische én probabilistische analyse overeenkomen, zie onderstaande tabel.

Glijcirkel geforceerd door	Waterstand 1/1 Stabilliteits-factor	Waterstand 1/1 Betrouwbaarheids-index	Waterstand 1/150 Stabilliteits-factor	Waterstand 1/150 Betrouwbaarheids-index	Waterstand 1/1000 Stabilliteits-factor	Waterstand 1/1000 Betrouwbaarheids-index
Dijk	1,479	10,609	1,400	9,243	1,158	4,516
Klei	1,571	23,249	1,334	8,780	1,131	4,295
Zand	2,183	16,152	1,659	10,130	1,254	5,615

Hierbij wordt opgemerkt dat de stabiliteitsberekeningen zijn gemaakt bij waterstanden corresponderend met overschrijdingsfrequenties gelijk aan de huidige normering (1/150 per jaar) en de norm waarop het ontwerp uit 2015/2016 is gebaseerd. Deze dienen niet te worden verward met de in hoofdstuk 5 berekende toets- en ontwerpnormen van respectievelijk 1/1.426 en 1/150.

7.3.3.3 Stap 3 Modelleren onzekerheden sterkte en belasting STBI

7.3.3.3.1 Modelonzekerheid

Voor de onzekerheid van het model Uplift Van is een lognormale verdeling gehanteerd met een gemiddelde van 0.995 en standaardafwijking van 0.033 (Deltares, 2017).

7.3.3.3.2 Sterkte

Voor de pilot is de schematisering van de bodemopbouw van de toetsing overgenomen. Hierbij is uitgegaan van lokaal grondonderzoek en van 1 type grondschematisering. Er zijn geen verschillende ondergrondscenario's toegepast.

Van de sterkteparameters van het dijkmateriaal en de bodemlagen zijn lognormale verdelingen opgesteld en onzekerheden toegekend. De grondparameters bestaan uit gedraineerde schuifsterktes, geen van de lagen is een cohesie toegekend. De verdeling is opgesteld op basis van de proevenverzameling opgenomen in de nadere veiligheidsanalyse van 2014 (Iv-Infra, 2014) In onderstaande tabel zijn de onzekerheden van de sterkteparameters opgenomen.

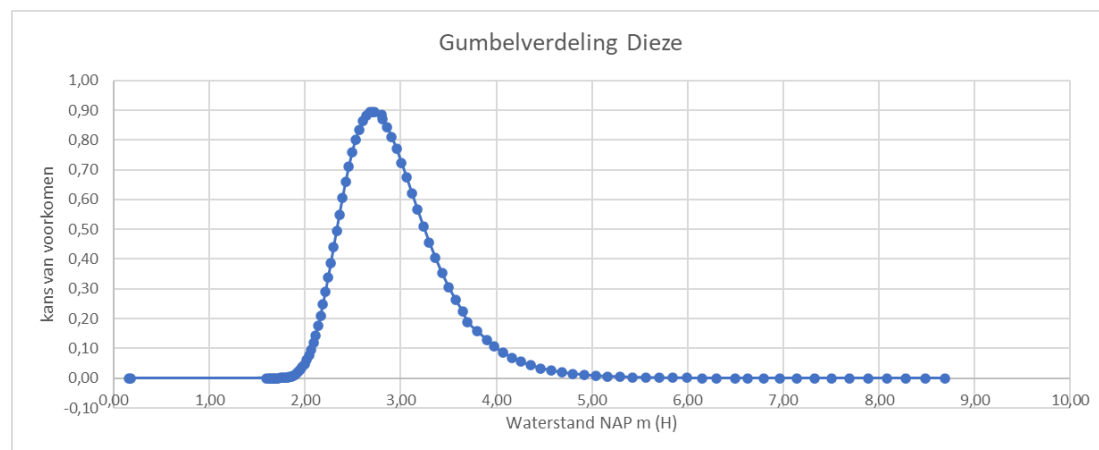
Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Tabel 7-4: Onzekerheden sterkteparameters dijkmateriaal en grondlagen

Grondlaag	Verdeling	Gemiddelde	standaarddeviatie
Iv_Klei, s/z kade	lognormaal	31,0	0,6
Iv_Klei, s/z onder mv	lognormaal	31,0	0,6
Iv_Zand	lognormaal	43,7	5,0
Iv_Zand PI	lognormaal	43,7	5,0

7.3.3.3 Belasting

Voor het opstellen van een waterstandsverdeling zijn de metingen van de Dieze ter plaatse van de Spuisluis Crevecoeur gebruikt. Deze metingen zijn van 1997 tot aan 2021 uitgevoerd en zijn op basis van deze metingen de jaarmaxima bepaald. Over de jaarmaxima is een gumbelverdeling gefit met behulp van de software 'Probabilistic Toolkit' van Deltares en is de waterstandverdeling in figuur 7-3 gegeven. Berekend is een gemiddelde waterstand van NAP +2,946 m en de standaarddeviatie 0,53 m.



Figuur 7-3: Gumbelverdeling waterstand Dieze

In de onderstaande tabel zijn de waterstanden gegeven die bij de verschillende terugkeertijden zijn af te lezen.

Tabel 7-5: Waterstanden bij terugkeertijden uit Gumbelverdeling

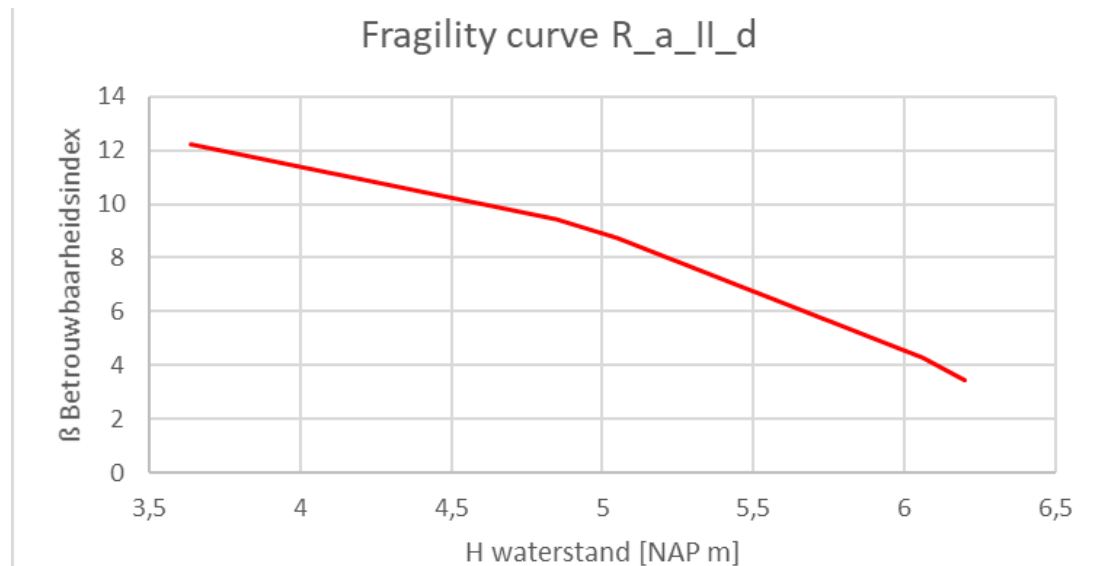
Terugkeertijd	Waterstand uit verdeling
10	4,02
30	4,46*
100	4,95
150	5,16
300	5,42*
1000	5,92
3000	6,37*
5000	6,90
10000	7,80*

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

* omwille van de aard van de pilot zijn deze waterstanden niet meegenomen in de analyse. De waterstand bij terugkeertijd 1/10.000 j is niet meegenomen omdat deze waterstand de kruinhoogte overstijgt

7.3.3.4 Stap 4 keuze rekenmodel STBI

Op basis van de handreiking Faalkansanalyse Macrostabiliteit (Deltares, 2017) is gekozen voor het toepassen van de methode van fragility curves. Een fragility curve (kwetsbaarheidscurve) geeft het verloop van de faalkans als functie van een belastingparameter, in dit geval waterstand, weer. Conform de memo Handreiking Fragility curves in D-Stability (Deltares, 1-10-2021) is een fragility curve opgebouwd op basis van de berekening van het vak R_a_II_d (zie figuur 7-4). Een alternatieve en gebruikelijke weergave is met de betrouwbaarheidsindex β op de verticale as in plaats van de faalkans, en is zo ook in figuur 7-4 opgenomen.



Figuur 7-4: Fragility curve macrostabiliteitsberekening vak R_a_II_d.

Bij het opstellen van de fragility curve zijn voor een aantal waterstanden in D-Stability kans op instabiliteit berekend (zie tabel 7-6). Tussen deze berekende betrouwbaarheidsindices (β) is een lineaire interpolatie gemaakt.

Tabel 7-6: Berekende betrouwbaarheidsindices stabiliteit vak R_a_II_d.

H_Waterstand [NAP m]	β _Betrouwbaarheidsindex	Faalkans [1/jaar]	Terugkeertijd [jaar]
3,64	12,201	1,54E-34	6,51E+33
4,85	9,421	2,24E-21	4,46E+20
5,05	8,78	8,15E-19	1,23E+18
6,06	4,295	8,75E-06	114338
6,2	3,455	2,76E-04	3628

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

De fragility curve en de waterstandverdeling zijn gecombineerd tot een kansbijdrage (kans op voorkomen waterstand x faalkans macrostabiliteit bij bepaalde waterstand).

Tabel 7-7: Kansbijdrage stabiliteit vak R_a_II_d.

H_Waterstand [NAP m]	Kans op voorkomen waterstand [1/jaar]	Faalkans STBI [1/jaar]	Kansbijdrage (Kans op voorkomen waterstand x faalkans STBI)	Terugkeertijd [jaar]
3,64	0,22369	1,54E-34	3,44E-35	∞
4,85	0,015059	2,24E-21	3,37E-23	∞
5,05	0,0084192	8,15E-19	6,86E-21	1,3966E+08
6,06	0,00081959	8,75E-06	7,17E-09	6,5343E+06
6,2	0,00056593	2,76E-04	1,56E-07	13271

7.3.3.5 Stap 5 Totale faalkans STBI

De faalkans wordt uiteindelijk bepaald door combinatie van de conditionele faalkans (fragility curve) en de waterstandstatistiek (Gumbelverdeling in figuur 7-3). De integraal van deze gecombineerde verdelingen geeft uiteindelijk de faalkans weer, zie onderstaande vergelijking (Deltares, 2017)

$$P_f = \int \Phi[-\beta(h)] f_h(h) dh$$

Aangezien de waterstandverdeling een kansverdeling is van jaarmaxima, is de berekende faalkans te definiëren als de jaarlijkse faalkans. Het resultaat van de berekende jaarlijkse faalkans en terugkeertijd is gegeven in tabel 7-8.

Tabel 7-8: Resultaten faalkansanalyse stabiliteit

Vak	Stabiliteits factor deterministisch bij T1000	Betrouwbaarheidsindex Probabilistisch bij T150	Betrouwbaarheidsindex geïntegreerd over waterstandsverdeling	Totale faalkans probabilistisch [1/ jaar]	Terugkeertijd probabilistisch [jaar]
R_a_II_d R_a_II_b	1,13 ntb	8,78	3,57	0,0177	5.640

De totale faalkans is berekend op betrouwbaarheid $\beta_{\text{dsn;STBI}}$ van 3,57, ofwel een faalkans van 1/5.640 jaar. Het designpoint van de waterstand die daar bij hoort is NAP +6,18 m en komt met een kleine kans van 1/780 jaar voor. Dit betekent dat de bijdrage van de onzekerheid in de waterstand een grote rol speelt, de overige onzekere parameters zoals sterkteparameters hebben hier nauwelijks een bijdrage in. Dit blijkt ook uit de invloedsfactoren die zijn berekend in de Probabilistic toolkit, waaruit blijkt dat de bijdrage van de waterstand 99,11% is en van de sterkteparameters 0,89%.

7.3.4 Piping (STPH)

De faalkans als gevolg van het faalmechanisme STPH is berekend middels Sellmeijer. De basissom is opgesteld voor het maatgevende vak

7.3.4.1 Stap 1 Basisberekening STPH

Net als bij het spoor STBI is voor STPH de zwakste schakel geselecteerd. De deterministische berekeningen uit de tweede ronde toetsing uit 2019 (rapport Antea) zijn als basis gebruikt voor de probabilistische analyse. In de tweede toetsronde is het gehele dijkvak goedgekeurd op het faalmechanisme STPH.

Uit de resultaten van deze toets volgt dat het dijkvak R_a_I_c (RDD_08) het meest maatgevend is voor dit faalmechanisme, aangezien in dit vak het verschil tussen de aanwezige kwelweglengte en de minimaal benodigde kwelweglengte het geringst is (<3 m), zie onderstaande tabel.

Tabel 7-9 Resultaten STPH tweede toetsronde (Antea, 2019)

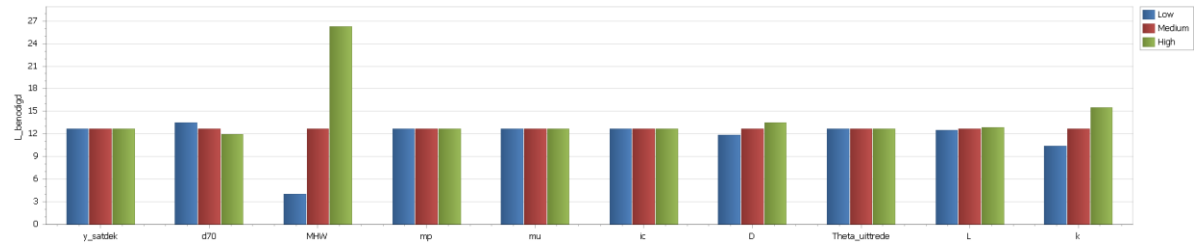
Dijkvak	Uitgangspunten berekening					Benodigde kwelweglengte [m]	Oordeel
	Dikte zandlaag [m]	Kwelweglengte [m]	Rekenpeil [m + NAP]	D ₇₀ [m]	Doorlatendheid k [m/s]		
R_a_I_a	Geen intredepunt voor piping.						voldoet
R_a_I_b	20,0	81	5,05	2,00E-04	2,29E-04	73	voldoet
R_a_I_c	20,0	65	5,05	2,00E-04	2,29E-04	62	voldoet
R_a_II_b	20,0	40	5,05	2,00E-04	2,29E-04	23	voldoet
R_a_II_c	Geen intredepunt voor piping.						voldoet
R_a_II_d	17,5	35	5,05	2,00E-04	2,29E-04	23	voldoet
R_a_II_e	20,0	70	5,05	2,00E-04	2,29E-04	55	voldoet
R_a_II_f	20,0	70	5,05	2,00E-04	2,29E-04	67	voldoet
R_b	20,0	70	5,05	2,00E-04	2,29E-04	65	voldoet

Met gebruik van de formules voor de drie deelfaalmechanismen van STPH (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie) uit de Schematiseringshandleiding Piping is in de probabilistic toolkit een nieuwe berekening gemaakt om de benodigde kwelweglengte te bepalen voor vak R_a_I_c. In deze semi-probabilistische berekening (Run model) zijn 5% ondergrens, dan wel 95% bovengrenswaardes gekozen voor de invoerparameters (conform de WBI parameterlijst). De berekende benodigde kwelweglengte is 48 m. Dit is minder dan de benodigde kwelweglengte van 62 m zoals die berekend is in de tweede toetsronde (zie tabel). Dit verschil wordt veroorzaakt doordat een aantal invoerparameters van de tweede toetsronde niet bekend zijn en voor die parameters zijn aannames gedaan en/of vereenvoudigingen doorgevoerd, zie verderop dit hoofdstuk.

7.3.4.2 Stap 2 Gevoeligheidsanalyse STPH

Met behulp van de probabilistic toolkit functie Sensitivity is de gevoeligheid van elke invoerparameter op het resultaat beschouwd. In onderstaand figuur wordt de gevoeligheid van elke invoerparameter op de benodigde kwelweglengte gepresenteerd. Hieruit volgt dat de buitenwaterstand (MHW) de grootste invloed heeft op het resultaat; een hoge buitenwaterstand leidt tot een grote benodigde kwelweglengte. De andere parameters met invloed zijn de doorlatendheid van het zandpakket (k), de dikte van het zandpakket (D) en de korrel diameter d₇₀.

Kenmerk R001-1282372BNB-V02



Figuur 7-5 Gevoeligheid invoerparameters voor berekende benodigde kwelweg

7.3.4.3 Stap 3 Modelleren onzekerheden sterkte en belasting STPH

7.3.4.3.1 Sterkte

Om een gedegen vergelijking te kunnen maken tussen de resultaten van de probabilistische analyse en de deterministische analyse uit de tweede toetsronde is de invoer van de parameters in de probabilistic toolkit zoveel mogelijk gelijk gehouden aan die van de deterministische analyse. Echter zijn niet alle invoerparameters van de deterministische toets bekend en in het kader van de pilot zijn een aantal invoerparameters vereenvoudigd. Onderstaande tabel toont de waarde en wijze van invoer (distribution) per parameter. Bij de stochasten is de gemiddelde waarde zo bepaald dat de design value (5% bovengrens of ondergrenswaarde) overeenkomt met de invoerparameter uit de tweede toetsronde. De variatiecoëfficiënten en standaarddeviaties zijn overgenomen uit de parameterlijst van het WBI.

Omdat de inputgegevens voor de potentiaalberekening (o.a. leklengtes, responsfactor) niet bekend zijn, is ervoor gekozen om uit te gaan van een responsfactor van 1,0 en de stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt gelijk te stellen aan de buitenwaterstand. Conform de Schematiseringshandleiding piping is dit een veilige benadering. In de berekeningen is de potentiaal bij uittredepunt vervangen door de buitenwaterstand.

Tabel 7-10 Invoerparameters STPH

Invoerparameter	Distribution	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Variatiecoëfficiënt	Design value
Volumiek gewicht deklaag [kN/m ³]	Lognormaal	17,3		5 %	15,9
Volumiek gewicht water [kN/m ³]	Determinist	9,81			
D70 [m]	Lognormaal	2,5 E-4		12 %	2,0 E-4
Toetspeil [m NAP]	Gumbel	3,01			
Doorlatendheid k [m/s]	Lognormaal	1,18 E-4		50 %	2,29 E-4
Hoogte maaiveld [m NAP]	Determinist	2,1			
Dikte deklaag [m]	Determinist	0,01*			
Dikte zandpakket [m]	Lognormaal	14		25 %	20
Aanwezige kwelweglengte [m]	Lognormaal	77		10 %	65

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Potentiaal polder [m NAP]	Determinist	2,1		
Modelfactor mp [-]	Lognormaal	0,1	0,1	0,84
Modelfactor mu [-]	Lognormaal	0,1	0,12	0,82
Heavegradient ic [-]	Lognormaal	0,5	0,1	0,35

* Ten behoeve van numerieke stabiliteit is een fictieve deklaagdikte van 0,01 m gehanteerd.

7.3.4.3.2 Belasting

De waterstandsverdeling is op dezelfde wijze gemodelleerd als bij het toetsspoor STBI.

7.3.4.4 Stap 4 Keuze rekenmodel

De probabilistische analyse van dijkvak R_a_I_c (RDD_08) op het faalmechanisme STPH is uitgevoerd met behulp van de probabilistic toolkit functie reliability. In de probabilistic toolkit zijn de STPH-formules afkomstig uit de Schematiseringshandleiding Piping ingevoerd en de benodigde kwelweglengte alsook de grenstoestandfuncties voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie worden door de toolkit uitgerekend. We beschouwen het systeem als gefaald indien elk deelmechanisme (opbarsten, heave én terugschrijdende erosie) faalt. Voor elke grenstoestandfunctie wordt met de probabilistic toolkit een betrouwbaarheidsindex β uitgerekend. Daarnaast wordt ook een betrouwbaarheidsindex voor het hele systeem uitgerekend.

7.3.4.5 Stap 5: Berekenen totale faalkans STPH

De totale faalkans van dijkvak R_a_I_c op het faalmechanisme STPH is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 7-11 Resultaten probabilistische berekening STPH dijkvak R_a_I_c

Deelfaalmechanisme	Betrouwbaarheidsindex	Kans op falen [%]	Terugkeertijd [jaar]
Hele systeem	4,06	0,00249	4,01E4
Uplift	-2,08	98,1	0,010
Heave	-2,09	98,2	0,010
Piping	4,06	0,00244	4,09E4

Uit de berekening volgt dat het systeem niet voldoet op de faalmechanismen opbarsten en heave. Op het faalmechanisme terugschrijdende erosie wordt wél voldaan, waardoor het hele systeem ook voldoet. De parameter met de meeste invloed op de faalkans van het systeem is de buitenwaterstand (72,8%). Dit komt overeen met de verwachting op basis van de gevoeligheidsanalyse.

7.3.5 Beoordeling en duiding resultaten

Zoals beschreven in Hoofdstuk 4 kan voor het dijkvak de volgende faalkansen worden afgeleid:

- De toetsnorm zonder maatregelen met een faalkanseis van 1/1.426. jaar
- De optimale ontwerpnorm uitgaande van het treffen van maatregelen zoals opgenomen in hoofdstuk 4 met een berekende faalkanseis van 1/150

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Let wel, deze afgeleide toetsnorm en ontwerpnorm zijn anders dan de benoemde veiligheidsnormen behorende bij de overschrijdingsfrequenties benoemd in 7.2.

Om deze faalkanseisen te vertalen naar doorsnede-eisen wordt gebruik gemaakt van de veiligheidsfilosofie van het WBI en OI.

Het afleiden van de faalkanseis op doorsnedeniveau is gelijk voor een semi-probabilistische en een probabilistische analyse. Het belangrijkste verschil is dat de beoordeling direct gaat op faalkanseis per doorsnede, zonder tussenkomst van de stabiliteits- of schadefactor (Deltares, 2017). De faalkanseis per doorsnede is als volgt gedefinieerd;

$$P_{eis,dsn} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N}$$

waarin

- $P_{eis,dsn}$ Faalkanseis die per doorsnede aan een faalmechanisme wordt gesteld (per jaar)
- P_{max} Maximaal toelaatbare overstromingskans van het dijktraject, in de wet aangeduid als ondergrens (per jaar)
- ω Faalkansruimtefactor voor het betreffende faalmechanisme (-)
- N Lengte-effectfactor (-)

Aangenomen was dat dat de kans op falen per doorsnede gelijk is aan de faalkans voor het representatieve vak. In de praktijk geldt echter dat naarmate een vak groter wordt er bij gelijkblijvende statistische eigenschappen van de doorsnede, zelfs bij een homogeen dijkvak, een grotere kans is dat er ergens in het vak een "slechte" doorsnede zit. Deze onzekerheid geldt met name bij de geotechnische faalmechanismes macrostabiliteit en piping en wordt ondervangen door het lengte-effect. Het lengte-effect geeft de invloed van variaties van dijk- en ondergrondeigenschappen weer binnen een dijktraject op de faalkans dat dijktraject.

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b}$$

waarin

- a Fractie van de lengte van het traject dat gevoelig is voor het betreffende faalmechanisme (-)
- b Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken voor het betreffende faalmechanisme (m)
- $L_{traject}$ Lengte van het dijktraject zoals vastgelegd in de Waterwet (m)

Het lengte-effect wordt bepaald door het type faalmechanisme. Bijvoorbeeld is parameter b een maat voor de lengte-effect gevoeligheid, deze is voor macrostabiliteit 50 m en voor piping 300 m. Voor macrostabiliteit geldt bijvoorbeeld dat de lengte van de afschuivende grondmoot bij praktijkgevallen in de orde van 50 tot 100 m ligt. Voor deze studie is voor de regionale keringen een gelijke waarde aangehouden als bij primaire keringen.

De parameter a geeft een fractie van de lengte dat gevoelig is voor het betreffende faalmechanisme. Voor deze parameter zijn in het WBI standaardwaarden gegeven. Voor deze pilot zijn deze standaardwaarden overgenomen uit het WBI (zie Tabel 7-12). Opgemerkt wordt dat in werkelijkheid mogelijk andere lengte-effectfactoren gelden voor regionale keringen, waardoor ook de faalkanseisen zouden wijzigingen. Het doel van deze pilot is echter het onderzoeken van de haalbaarheid van de methode, en niet het bepalen van de daadwerkelijke faalkans van het dijkvak.

Tabel 7-12: standaard factoren ter bepaling lengte-effect

	STBI	STPH
Lengte vak	4350 m	4350 m
a	0,033	0,9*
b	50	300
N	3,9	14,1

* Omdat het gebied relatief hoog-pipinggevoelig is, wordt een a van 0,9 gehanteerd.

Naast het lengte-effect wordt de faalkansbegroting meegenomen in de berekening van de faalkanseis op doorsnedeniveau. De faalkansbegroting is de verdeling van de faalkansruimte over de verschillende toetssporen. De beschikbare faalkansruimte van een toetsspoor wordt aangegeven met een faalkansruimtefactor ω (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 2017) en is in het WBI voor de verschillende toetssporen voor de gedetailleerde toets per vak en faalkansruimte gegeven

Ook hier is het vrij aan de toetser om deze faalkansruimtes in te delen en kan op basis van expert judgement of kan de invloed van de faalkansruimtes op de totale faalkans worden benaderd door een gevoeligheidsanalyse. Daarbij geldt dat:

- Het totaal van de faalkansruimtefactoren voor de toetssporen 100% blijft.
- De faalkansbegroting voor het hele traject geldt, dus voor alle vakken.

In het geval van regionale keringen zullen faalkansbijdrages van een aantal toetssporen minder zwaar wegen dan voor primaire keringen. In het geval van deze pilot is voor het gemak gekozen om niet van de basisfaalkans faalkansruimte af te wijken, 0,24 voor piping en 0,04 voor stabiliteit binnenwaarts.

In de onderstaande tabellen zijn de resultaten van de faalkansanalyse per faalmechanisme gegeven.

Tabel 7-13 Faalkans en faalkanseis STBI

Pmax	Faalkansruimte STBI	Peis _{traject}	N	Peis _{dsn}	Berekende faalkans	Faalkans voldoet aan eis?
1/1.495	0,04	1/37.375	3,9	1/144.763	1/5.640	Nee
1/150	0,04	1/3.750	3,9	1/14.516	1/5.640	Nee

Tabel 7-14 Faalkans en faalkanseis STPH

Pmax	Faalkansruimte	Peis _{traject}	N	Peis _{dsm}	Berekende faalkans	Faalkans voldoet aan eis?
1/1495	0,24	1/6229	14,1	1/87.829	1/40.100	Nee
1/150	0,24	1/625	14,1	1/8.813	1/40.100	Ja

Voor beide faalmechanismen geldt dat ze niet voldoen aan de faalkanseis op doorsnedeniveau bij een maximaal toelaatbare faalkans van 1/1.495 per jaar (toetsnorm zonder maatregelen). Voor de faalkans van 1/150 per jaar (ontwerpnorm met maatregelen) voldoet piping wel.

Deze toetsmethode geeft een negatiever resultaat dan de vigerende methode. De dijk is recent versterkt en uit de toetsing van 2019 volgen geen onvoldoende oordelen voor stabiliteit en piping.

Deze negatieve uitkomsten kunnen verklaard worden door dat diverse parameters niet voorhanden waren en hier aannames voor zijn gedaan. Ook het lengte-effect en het gebruik van het faalkansen systeem van de primaire keringen dragen bij. Voor stabiliteit binnenwaarts (STBI) geldt dat de faalkansruimte zwaar weegt in de vereiste faalkans voor stabiliteit. De faalkansruimte voor stabiliteit zou mogelijk nog op basis van ervaring aangepast of uitgeruild kunnen worden met een ander faalmechanisme. Dit zou al tot een veel gunstigere faalkanseis leiden.

In deze pilot zijn standaardwaarden voor de faalkansruimte gebruikt die volgen uit het WBI, de verwachting is echter dat de faalkansbegroting voor een regionale kering er anders uit ziet dan bij een primaire kering. Een aantal faalmechanismes spelen bij een regionale kering een veel mindere grotere rol dan bij primaire keringen en visa versa.

Voor piping geldt dat het lengte-effect zwaar weegt in de vereiste faalkans op doorsnedeniveau. Het oordeel op piping op doorsnedeniveau verandert drastisch wanneer het lengte-effect niet wordt meegenomen. Daarnaast bestaat ook de mogelijkheid om het lengte-effect te optimaliseren. Ook hier geldt dat er standaardfactoren zijn toegepast voor het bepalen van de grootte van dit effect, die zijn gekalibreerd op primaire keringen. Door het toepassen van andere factoren kan het lengte-effect mogelijk veranderen.

In het algemeen kan geconcludeerd worden dat naar verwachting de faalkansruimte en het lengte-effect anders zullen zijn bij een regionale kering dan bij een primaire kering en dit nader onderzocht dient te worden. Daarnaast wordt in deze pilot uitgegaan van één bodemscenario, wat het slechtste scenario per vak is, terwijl in de WBI-methodiek rekening wordt gehouden met meerdere (bodem)scenario's in 1 vak. Hierdoor wordt de faalkans overschat.

7.3.5.1 Van een oordeel van een doorsnede naar een vakoordeel

Voor faalmechanismes piping (STPH) en macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) is een maatgevende doorsnede beoordeeld. Op basis van deze maatgevende doorsnede kan dan

bepaald worden of een vak aan een doorsnede-eis voldoet. De vakken zijn immers zo in de toetsing gekozen dat de eigenschappen zoals geometrie, bodemopbouw en hydraulische randvoorwaarden per vak gelijkwaardig zijn. Daarbij wordt wel uitgegaan van het idee dat de lengte van de dijkvakken relatief kort zijn gekozen.

7.3.5.2 Van een vakoordeel naar een trajectoordeel

In deze pilot is gezocht naar een pragmatische aanpak, gekeken is hoe een oordeel van een vak vertaald kan worden naar een oordeel van een traject. Daarbij willen we voorkomen dat voor ieder dijkvak een probabilistische berekening gemaakt moet worden om tot een oordeel te komen. Voor elk vak een probabilistische berekening op te stellen is tijdrovend en wellicht niet nodig.

In principe is een dijktraject met meerdere dijkvakken te beschouwen als een seriesysteem waarbij falen van één dijkvak falen van het systeem inhoudt. Daarbij is de kans van het falen van het dijktraject gelijk aan 'kans op falen vak 1' óf 'kans op falen vak 2' óf 'kans op falen vak x' etc. Dit betekent dat het optellen van de vakkansen een goede benadering is voor de overstromingskans van het dijktraject.

In de praktijk wordt de kans van falen van een dijktraject vaak gedomineerd door de dijkvakken waar de hoogste kans van falen is berekend. Een versimpelde manier van toetsen zou zijn om de 'zwakste' vakken uit de reguliere toetsing te filteren en van deze vakken middels een probabilistische methode een faalkanseis op doorsnede te berekenen. Indien het zwakste vak al aantoonbaar dat de kans op falen klein is, zullen de overige vakken het eindoordeel niet anders maken. Hiermee is een verdere beoordeling van de overige vakken niet nodig en wordt onnodige inspanning voorkomen.

Indien voor het zwakste vak wel een hoge kans van falen is berekend, wordt de faalkans van het volgende zwakke vak berekend en de bijdrage op de totale faalkans door ze op te tellen. Indien de bijdrage van het volgende zwakke vak verwaarloosbaar is op de totale faalkans, wordt gestopt met toetsen, zo niet wordt van het volgende zwakke vak de faalkans berekend. Op deze manier kan er snel een oordeel gegeven worden aan een traject (voldoet wel of niet aan de norm). Het nadeel van deze methode is echter dat het geen inzicht geeft in de status en het gedrag van de kering op vakniveau.

7.4 Basisfaalkansen en likelihood methode

Deze methode is nog niet volledig ontwikkeld voor het beoordelen van de waterveiligheid van waterkeringen. In deze paragraaf wordt daarom geen volledige toetsing uitgevoerd maar wordt beschouwd hoe zo'n methode er uit zou kunnen zien (gedachte-experiment). Het basisidee is om voor verschillende typen keringen een basis 'fragility curve' op te stellen. Door deze te combineren met de lokale waterstandstatistiek kunnen eenvoudig faalkansen worden afgeleid. Ook zou deze methode makkelijk gecombineerd kunnen worden met bewezen sterkte.

In de onderstaande paragrafen is stapsgewijs in beeld gebracht/beschreven, hoe zo'n methode zou kunnen werken.

7.4.1 Opzetten fragility curves van basisfaalkansen

Gedacht kan worden aan de hand van basisfaalkansen een fragility curve op te stellen.

Voor het opstellen van basisfaalkansen kan als voorbeeld de methode die de Army Corps of Engineers hanteert verder uitgewerkt worden. In deze methode wordt een Levee Screening (LTS Tool) toegepast waarbij onder andere basiskansen zijn gegeven aan faalmechanismes (basiskans op falen). Daarbij kunnen zowel de kwalitatieve oordelen vanuit een inspectie opgenomen worden als vanuit een kwalitatieve toetsing.

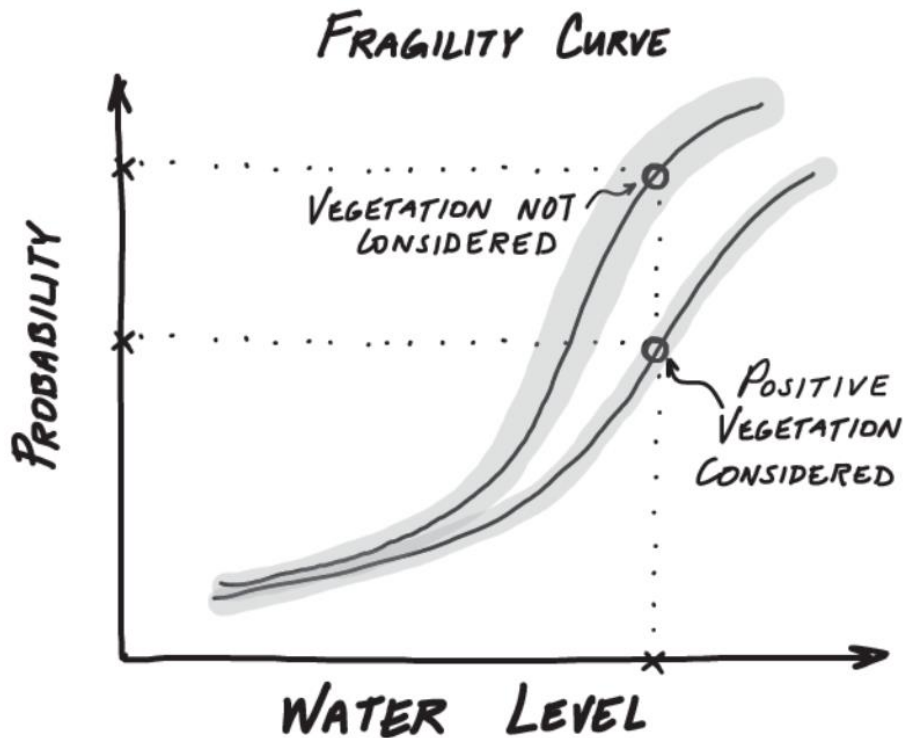
Vervolgens wordt middels de kwalitatieve beoordeling een basisfaalkans toegekend aan een faalmechanisme. In figuur 7-6 is een voorbeeld opgenomen voor piping.

Embankment and Foundation Seepage and Piping Performance Mode						Yes
Has the levee ever experienced a failure breach due to this performance mode prior to overtopping? If yes, how many times?						
Has heroic floodfighting ever been used to prevent failure breach due to this performance mode prior to overtopping? If yes, how many times?						
ICW Name	ICW Number	ICW Description	Inspection Rating	Assessment Rating	Comments	Likelihood Ratio
Levees	1	Unwanted Vegetation Growth		U		1,32
Levees	3	Encroachments		U		1,32
Levees	7	Settlement		A		0,76
Levees	9	Cracking		A		0,76
Levees	10	Animal Control		M		1,10
Levees	11	Culverts / Discharge Pipes		M		1,10
Levees	14	Underseepage Relief Wells / Toe Drainage Systems		M		1,10
Levees	15	Seepage		U		14,80
Conditional Performance Index for Embankment and Foundation Seepage and Piping						1,92E-02

Figuur 7-6: Voorbeeld kwalitatieve beoordeling stabiliteit en toekenning basisfaalkans

Daarnaast kan ook een kwalitatieve beoordeling gemaakt worden van het gedrag van de waterkering. Hierbij te denken aan welke waterstand de waterkering al heeft overleefd en bij welke waterstand verwacht wordt dat deze slechter wordt. Op basis van deze gegevens kunnen bij verschillende belastingniveaus de basisfaalkansen worden bepaald. Door de belastingniveaus ten

opzichte van de basisfaalkansen te plotten kan per faalmechanisme een fragility curve opgesteld worden (zie voorbeeld in figuur 7-7).

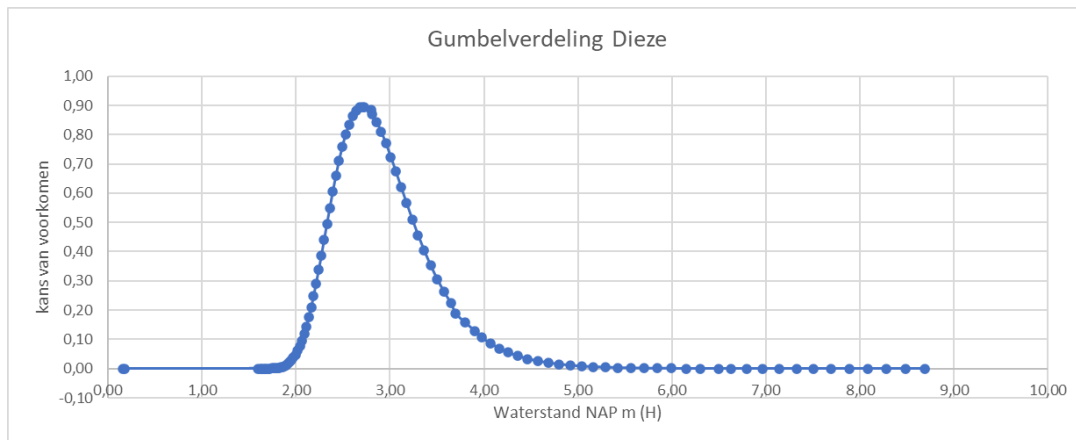


Figuur 7-7: Voorbeeld fragility curve waarbij waterstanden geplot zijn ten opzichte van basisfaalkansen.

Een fragility curve kan vanuit de toetsing opgesteld worden, maar bij nadere inspectie vanuit beheer ook aangescherpt worden, wat kan leiden tot een lagere faalkans. Andersom kan ook door bijvoorbeeld een probabilistische analyse de faalkans scherper gesteld worden.

7.4.2 Combineren fragility curves met waterstandstatistiek

De resulterende 'fragility curves' kunnen daarna worden gecombineerd met de waterstandstatistiek tot een overstromingskans. Voor het opstellen van een waterstandsverdeling worden de jaarmaxima van de waterstanden genomen en kan gefit worden op een Gumbelverdeling (zie voorbeeld in figuur 7-8).



Figuur 7-8: Voorbeeld Gumbelverdeling waterstanden Dieze bij het pilotgebied

De combinatie van de fragility curves met de waterstandstatistiek wordt gemaakt door voorwaardelijke faalkansen (faalkans bij een gegeven waterstand) van het desbetreffende faalmechanisme te vermenigvuldigen met de waterstandsverdeling. Dit resulteert dan tot een grafiek waarbij per waterstand de kansbijdrage van het faalmechanische per jaar is af te lezen.

De jaarlijkse faalkans van een vak/traject wordt uiteindelijk bepaald door de integraal van deze gecombineerde verdelingen (oppervlakte) zie onderstaande vergelijking (Deltares, 2017)

$$P_f = \int \Phi[-\beta(h)]f_h(h)dh$$

Hierbij bestaat de mogelijkheid bewezen sterkte toe te passen wanneer een waterkering een waterstand meerdere keren heeft overleefd. Dit kan vrij eenvoudig door de faalkansbijdrage van de faalmechanismes voor alle waterstanden lager dan de overleefde waterstand naar beneden te stellen (of grofweg op 0 te stellen) en vervolgens opnieuw de integraal te berekenen voor de jaarlijkse faalkans van een vak/traject.

7.5 Conclusies, discussie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zijn twee verschillende toetsmethoden voor regionale waterkeringen onderzocht. Onderstaand wordt per methode aangegeven in hoeverre deze toepasbaar was voor de beschouwde pilot, en hoe kansrijk toepassing voor andere regionale keringen wordt geacht. De conclusie en aanbevelingen richten zich op de ervaringen met de toepassing van de methoden. Daarbij ging het om de toepasbaarheid op zich, alsmede bv. de beschikbaarheid van de benodigde gegevens en de doenbaarheid. Voor wat betreft de uitkomsten is vooral de reproduceerbaarheid relevant. De uitkomst heeft in absolute zin geen betekenis, onder andere doordat bij de toepassing van een methode zo nodig globale aannamen zijn gedaan of de werkwijze op onderdelen is aangepast teneinde tot een uitkomst te komen.

Probabilistische toetsmethode

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

Bij het dijkvak zou een probabilistische benadering passen. Het falen van de dijk is sterker gerelateerd aan de hoogwaterstand dan andere type regionale keringen zoals boezemkades, en de waterstand is een parameter die goed probabilistisch te benaderen is. Met dit gegeven past een toetsmethode waarbij de onzekerheid van de waterstanden wordt meegenomen beter bij deze dijk dan een methode als bewezen sterkte (HKV, 2021).

Een aanbeveling is om het effect van de faalkansruimteverdeling en het lengte-effect bij regionale keringen te onderzoeken. In deze pilot zijn standaardwaarden voor de faalkansruimte gebruikt die volgen uit het WBI, hier zit nog ruimte voor optimalisatie in. Naar verwachting zal de faalkansbegroting er bij een regionale kering over het algemeen anders uit zien dan bij een primaire kering en tellen andere mechanismes zwaarder mee.

Ook zal het lengte-effect anders zijn bij een regionale kering dan bij een primaire kering. Voor het faalmechanisme piping zal in het algemeen de gevoeligheid voor piping anders zijn dan voor primaire keringen. Daarnaast zouden meerdere ondergrondscenario's kunnen worden meegenomen conform het WBI, of zou onderzocht kunnen worden hoe het lengte-effect doorwerkt wanneer er van een maatgevende doorsnede en maatgevende bodemopbouw uitgegaan in plaats van verschillende ondergrondscenario's.

Een nadeel van een volledige probabilistische analyse is dat deze bewerkelijk en tijdrovend is. Er is veel informatie nodig over verschillende parameters, die niet altijd voorhanden is. Ook zijn er faalmechanismen waarvoor op het moment van schrijven nog geen probabilistische methode beschikbaar is.

Het toepassen van een versimpelde methode zoals in deze pilot gedaan zou uitkomst kunnen bieden, door bijvoorbeeld alleen de faalmechanismen met een groot aandeel in de faalkans te beschouwen, waarbij per faalmechanisme alleen de zwakste vakken worden beschouwd. De vakken die ruim voldoen dragen immers niet bij in de faalkans van een mechanisme. Andersom kan ook gesteld worden wanneer de zwakste vakken ruim voldoen, verder toetsen niet meer nodig is.

Nadeel van deze zwakste schakel benadering is dat er geen totaaloverzicht is van de faalkansen per vak. Daarnaast is de berekende faalkans op trajectniveau conservatief. Verder wordt opgemerkt dat, om in te schatten welke vakken/faalmechanismen de grootste bijdrage aan de faalkans hebben, al een eerdere toetsing beschikbaar moet zijn.

Basisfaalkansen en likelihood ratios

Met deze methode lijkt het mogelijk om op een eenvoudige manier een overstromingsrisico op te stellen voor een dijk. Dit kan door gebruik te maken van een kwalitatieve beoordeling met basisfaalkansen. De kwalitatieve beoordeling is voor veel betrokkenen beter te duiden. Groot voordeel daarbij is dat het mogelijk is het beheerdersoordeel te integreren in de overstromingskans van een dijk. Daarnaast kunnen de basisoverstromingskansen bij gegeven

Kenmerk R001-1282372BNB-V02

waterstanden eenvoudig naar boven of beneden bijgesteld worden op basis van veldwaarnemingen of gedetailleerde modelberekeningen.

Ook maakt deze methode het toepassen van bewezen sterkte eenvoudig. Onder- en bovengrensschattingen kunnen bijvoorbeeld gemaakt worden op basis van kansen op overloop en overleefde belastingen.

Anderzijds zou deze methode minder goed kunnen uitpakken bij bijvoorbeeld een boezemkering. De kans op falen is hier minder sterk gerelateerd aan de buitenwaterstand dan voor primaire waterkeringen, of keringen langs regionale rivieren zoals in deze pilot. Falen van een boezemkering kan ook optreden doordat er bijvoorbeeld te diep gebaggerd is of de waterkering, of langere tijd onderhevig is aan neerslag of zware verkeersbelasting, of een combinatie van factoren. Een ander voorbeeld is dat veenkades gevoelig zijn voor droogte. Niet geheel duidelijk is hoe hier in deze methode mee om kan worden gegaan. Mogelijk kunnen er fragility curves voor verschillende scenario's, zoals hoogwater na droogte, met en zonder verkeer, etc. worden opgesteld.

Algemeen

In deze en de andere pilots is de toepasbaarheid van een aantal verschillende methodes voor het toetsen van regionale waterkeringen beschouwd. Hierbij is met name gekeken naar de beschikbaarheid van methodieken, kentallen, benodigde gegevens etc. om de toetsmethode uit te kunnen voeren, en de omvang van de vereiste inspanning. Een aspect dat hierbij mogelijk onderbelicht is gebleven is de 'begrijpbaarheid' van de verschillende methodes. Veel van de beschouwde methodes, zoals een probabilistische toetsing, zijn technisch complex en maar voor een beperkt aantal mensen goed te doorgronden. Naast de technisch specialisten die de toetsingen uitvoeren zijn er in de praktijk veel andere mensen betrokken bij regionale waterkeringen die veelal geen technische en/of academische achtergrond hebben. Hierbij kan worden gedacht aan bestuurders en beheerders, maar ook bijvoorbeeld omgevingsmanagers, uitvoerders en omwonenden van een dijkversterking. Het verdient daarom aanbeveling om bij het kiezen van een toetsmethode ook met hen rekening te houden.

8 Bibliografie

- Antea. (5 augustus 2019). *Toetsrapportage Ronde Toetsing Regionale Waterkeringen*.
- Deltares. (1-10-2021). *Aan de slag met D-Stability en Fragility curves*.
- Deltares. (2011). *Analyse van slachtofferrisico's waterveiligheid 21e eeuw*.
- Deltares. (2017). *Handreiking Faalkansanalyse Macrostabieleit*.
- Deltares. (april 2017). *Standaardmethode 2017: Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen*.
- Deltares. (september 2009). *Slachtofferrisico's door overstromingen, Voorstel voor indicatoren voor gebruik in de discussie over nieuwe normen voor de waterkeringen*.
- HKV. (2021). *Tabel Rekenmethodes*.
- HKV. (december 2013). *Overstromingsbeelden bij doorbraak regionale keringen rond Den Bosch*.
- HKV. (juni 2021). *Overstromingsmaatregelen en systeemmaatregelen Pilot locatie Ommoord*.
- Hydrologic. (december 2006). *Hoogwaterberekeningen Dommel en Aa, P120*.
- Iv-Infra. (2014). *Analyse veiligheidsopgave 'Rechter Diezedijk', nadere analyse veiligheidsopgave*.
- Iv-Infra. (23-2-2015). *Ontwerpnota Rechter Diezedijk*.
- (2008). *Richtlijn - Normering keringen langs regionale keringen*. Utrecht: STOWA.
- Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving. (2017). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- STOWA. (1 april 2021). *Uitwerking top 4 onderzoeksvragen*.
- STOWA. (2008). *Richtlijn - Normering keringen langs regionale rivieren*. Utrecht.
- STOWA. (juli 2021). *Overschrijdingskans overstromingskans regionale keringen, technische vergelijking tussen de overschrijdingskans en overstromingskans*.
- Vrijling, J. (1985). *Enkele gedachten aangaande een aanvaardbaar risiconiveau in Nederland*.

Opdrachtgever: **stowa**

Herbeschouwing veiligheidsbenadering regionale waterkeringen

Rapportage gebiedspilot polder Heerhugowaard



Opdrachtgever:

stowa

Herbeschouwing veiligheidsbenadering regionale waterkeringen

Rapportage gebiedspilot polder Heerhugowaard

november 2021

Colofon

Auteur:

Martin Nieuwjaar (Martin Nieuwjaar Advies).

Presentatie bij startbijeenkomst:

Kasper Lendering (AWA-Consult en TU Delft).

Klankbordgroep:

Cees de Boer, Jan-Willem Evers, Roald van Gameren, Jannes Haanstra, Gerard Janssen, Niek Postma, Theo Reuzenaar en Thijs Zonneveld (allen Hollands Noorderkwartier) en Ronald van Klinken (voorheen Hollands Noorderkwartier).

Contactpersoon voor opdrachtgever:

Robin Biemans (STOWA).

Review:

Richard Jorissen (Rijkswaterstaat en TU Delft).

Copyright	Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer	Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaardt de auteur geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.
Foto op kaft	Huigendijk N508, nabij Oterleek (Google Earth).

Voorwoord

Dit rapport doet verslag van de gebiedspilot die in opdracht van STOWA is uitgevoerd voor de polder Heerhugowaard, in het kader van het Onderzoeksprogramma Regionale Keringen (ORK-IV). Verkend is of de voor primaire waterkeringen vigerende overstromingskansbenadering toepasbaar is op regionale waterkeringen, welke karakteristieken hierbij een rol spelen en welke meerwaarde de toepassing oplevert. De overstromingskansbenadering blijkt toepasbaar, praktisch uitvoerbaar en meerwaarde te bieden om onderbouwd te kiezen voor de meest doelmatige maatregel.

Voor de primaire waterkeringen geldt sinds 2017 de overstromingskansbenadering als nieuwe veiligheidsbenadering. Voor de regionale waterkeringen is de overschrijdingskansbenadering de vigerende veiligheidsbenadering. Deze veiligheidsbenadering is gebaseerd op technische inzichten van meer dan 20 jaar oud en het bij de toetsing gehanteerde veiligheidsniveau is destijds gekalibreerd (principe van 'geen trendbreuk') op uitgangspunten die meer dan 30 jaar oud zijn.

Bovenstaande geeft aanleiding om ook de huidige veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen opnieuw tegen het licht te houden. In de Visie op de regionale waterkeringen 2016 is dit onderkend en is de herbeschouwing van de veiligheidsbenadering als doelstelling geformuleerd. In het Onderzoeksprogramma Regionale Keringen (ORK-IV) zijn acties opgenomen om aan deze doelstelling invulling te geven. In de Visie is opgenomen dat wordt gestart met het uitvoeren van gebiedspilots. Op deze manier wordt concreet inzicht verkregen in de mogelijke meerwaarde van actualisatie van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen.

De gebiedspilot is in afstemming met Hollands Noorderkwartier, de beheerder van de betreffende regionale waterkeringen, uitgevoerd voor de polder Heerhugowaard. In de gebiedspilot Heerhugowaard is gebleken dat de overstromingskansbenadering toepasbaar en praktisch uitvoerbaar is. De karakteristieken van de overschrijdingskansbenadering en de overstromingskansbenadering zijn naast elkaar gepresenteerd. Verder is geconstateerd dat de overstromingskansbenadering meerwaarde oplevert:

- Het beschermingsniveau kan kosteneffectief worden bepaald, waardoor desinvestering wordt voorkomen. Gebleken is dat de vereiste faalkans een orde strenger uitpakt dan de faalkans die hoort bij de normering volgens de overschrijdingskansbenadering. De economische aspecten ('kosten en baten') zijn bepalend voor de hoogte van het vereiste beschermingsniveau.
- De vereiste extra inspanning bij toetsing kan beperkt blijven. De toetsing op veiligheid kan worden ingevuld op basis van de keringsinformatie die reeds is verzameld. Bij keuze voor een semi-probabilistische rekenaanpak is de vereiste inspanning bij de toetsing vergelijkbaar met de inspanning bij de vigerende veiligheidsbenadering. Keuze voor een probabilistische rekenaanpak, waarbij ook bewezen sterkte van de regionale keringen onderbouwd in beschouwing kan worden genomen, vraagt om het doorrekenen van meerdere belastingsituaties.
- Binnen de overstromingskansbenadering is het mogelijk om een zuivere afweging te maken tussen maatregelen: kadeverbetering, beheermaatregelen (zoals beperken van verkeersbelasting) en maatregelen op systeemniveau (extra gemaalinzet, boezemcompartimentering). Daardoor kan onderbouwd worden gekozen voor de maatregel die het meest doelmatig (kosteneffectief) is. Hiervoor is het wel noodzakelijk om te investeren in kennis over het (faal)gedrag van het watersysteem. En ook is een raming nodig van de kosten van maatregelen.

Dit rapport, dat in afstemming met STOWA en Hollands Noorderkwartier tot stand is gekomen, vormt een bouwsteen voor de toekomstige keuze over de te hanteren veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen.

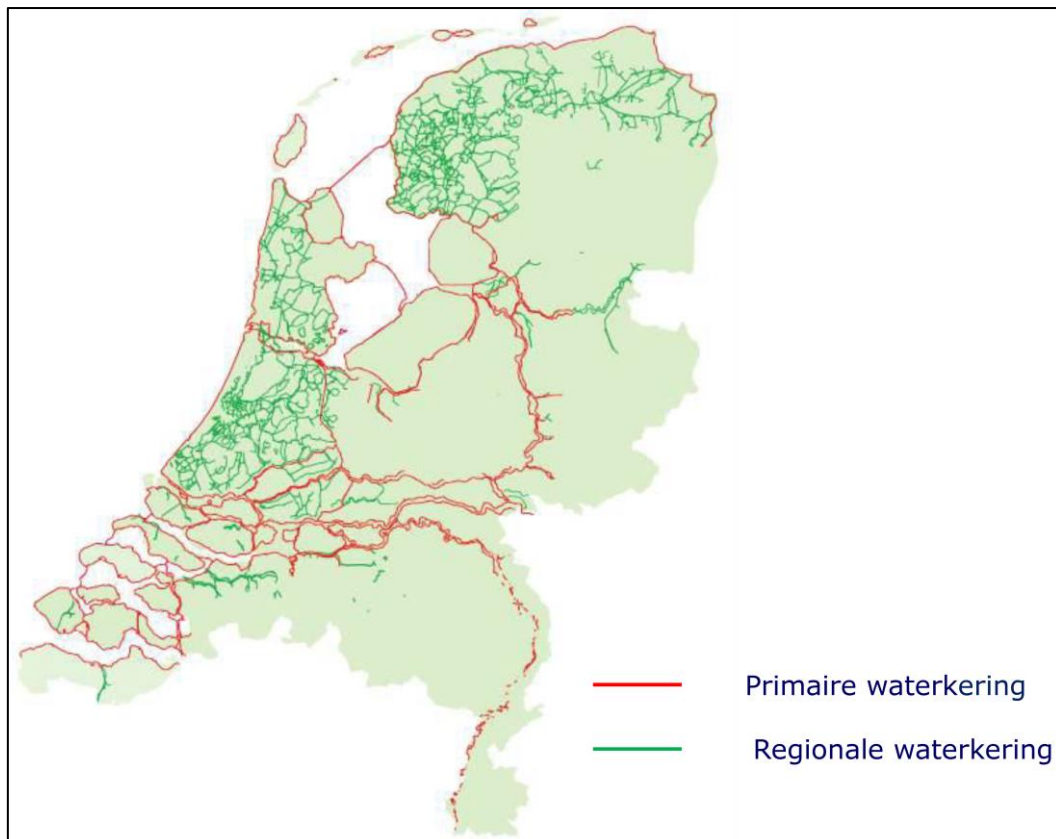
Inhoud

Voorwoord	iii
1. Inleiding	1
2. Beschrijving polder Heerhugowaard	4
2.1 Inleiding	4
2.2. Landgebruik	4
2.3 Maaiveldhoogten	5
2.4 Regionaal watersysteem	5
2.5 Boezemkaden	7
2.6 Bodemopbouw	9
3. Overschrijdingskansbenadering	11
3.1. Inleiding	11
3.2 Veiligheidsbenadering	11
3.3 Vereist beschermingsniveau	12
3.4. Toetsen op veiligheid	15
3.5 Maatregelen	17
4. Overstromingskansbenadering	19
4.1. Inleiding	19
4.2 Veiligheidsbenadering	19
4.3 Vereist beschermingsniveau	19
4.4. Toetsen op veiligheid	23
4.5 Maatregelen	26
4.5.1 Kadeverbetering	26
4.5.2 Verkeersmaatregelen	27
4.5.3 Extra gemaalcapaciteit	28
4.5.4 Boezemcompartimentering	29
5. Conclusies en aanbevelingen	30
5.1 Conclusies	30
5.2 Aanbevelingen	35
Literatuur	37
Overzicht bijlagen	40
Bijlage 1: Overschrijdingskansbenadering: Toetsen op veiligheid voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts	41
Bijlage 2: Overschrijdingskansbenadering: Dimensioneren verbetermaatregelen voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts	44
Bijlage 3: Overstromingsinformatie	46
Bijlage 4: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege individueel risico	52

Bijlage 5: Overstromingskansbenadering: Analytische afleiding economisch optimale faalkans bij kadeverbetering	58
Bijlage 6: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege economisch risico	61
Bijlage 7: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege groepsrisico (indicatief).....	65
Bijlage 8: Overstromingskansbenadering: Resumé vereiste faalkans.....	68
Bijlage 9: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans als signaleringswaarde, ondergrens en normklassen	69
Bijlage 10: Overstromingskansbenadering: Lengte-effect	72
Bijlage 11: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans volgens overschrijdingskansbenadering	74
Bijlage 12: Overstromingskansbenadering: Aanwezige faalkans voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij semi-probabilistische rekenaanpak.....	75
Bijlage 13: Overstromingskansbenadering: Toetsoordelen faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts.....	76
Bijlage 14: Overstromingskansbenadering: Kadeverbetering als maatregel	77
Bijlage 15: Overstromingskansbenadering: Beperken verkeersbelasting als maatregel	79
Bijlage 16: Overstromingskansbenadering: Inzet van extra gemaalcapaciteit als maatregel.....	82
Bijlage 17: Overstromingskansbenadering: Inzet van boezemcompartimentering als maatregel	86

1. Inleiding

Naast de primaire waterkeringen (circa 3.500 km), die bescherming bieden tegen overstrooming vanuit het buitenwater, heeft Nederland meer dan 10.000 km aan regionale waterkeringen. De primaire waterkeringen zijn aangewezen en genormeerd door het Rijk, en zijn in beheer bij de waterschappen en Rijkswaterstaat. De aanduiding regionale waterkering heeft betrekking op de juridische status van deze waterkeringen: ze zijn aangewezen en genormeerd door de provincies (voor de waterkeringen in beheer bij de waterschappen) of door het Rijk (voor de waterkeringen in beheer bij Rijkswaterstaat, ook wel de regionale Rijkskeringen genoemd).



Figuur 1: Primaire en regionale waterkeringen in Nederland (situatie 2016)

Regionale waterkeringen kunnen voor wat betreft waterveiligheid meerdere technische functies vervullen (Unie van Waterschappen, 2004):

1. **Keringen, die ander water¹ keren**
Voorbeelden hiervan zijn boezemkaden, dijken langs regionale rivieren, dijken langs kanalen en dijken langs wateropslagbekkens.
2. **Droge keringen**
Voorbeelden hiervan zijn compartimenteringsdijken, slaperdijken en landscheidingen.
3. **Keringen, die buitenwater keren, maar geen primaire waterkering zijn**
Voorbeelden hiervan zijn voorlandkeringen en zomerkades.

Bij de bovenstaande technische waterveiligheidsfuncties staat de bescherming tegen overstrooming van het gebied achter de regionale waterkering centraal. Daarnaast spelen regionale waterkeringen ook een belangrijke rol bij de vervulling van andere taken die een waterbeheerder soms vervult. Daarbij kan worden gedacht aan het in stand houden van een boezemstelsel, van belang voor de

¹ Met 'ander water' wordt het water bedoeld dat wettelijk niet als buitenwater is aangemerkt.

afvoer en aanvoer van water, en aan het in stand houden van een vaarwegstelsel, van belang voor het scheepvaartverkeer. Ook vanuit die andere taken kunnen er eisen gelden. Dit blijft echter in het vervolg van dit rapport buiten beschouwing.

De vigerende veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen is de overschrijdingskansbenadering. Deze is gebaseerd op technische inzichten van meer dan 20 jaar oud. Het bij de toetsing gehanteerde veiligheidsniveau is bovendien gekalibreerd op uitgangspunten van 30 tot 50 jaar oud (Nieuwjaar, 2020).

Voor de primaire waterkeringen is sinds januari 2017 een nieuwe veiligheidsbenadering van kracht: de overstromingskansbenadering (Slootjes & Van der Most, 2016a, 2016b; Kok et al., 2017). Deze vervangt de overschrijdingskansbenadering die voor de primaire waterkeringen eerder gold. Belangrijke redenen om de veiligheidsbenadering voor de primaire waterkeringen te actualiseren was dat de onderliggende risicobenadering (kansen en gevolgen) het mogelijk maakt om gericht te investeren in veiligheid.

Bovenstaande geeft aanleiding om ook de huidige veiligheidsbenadering voor de regionale waterkeringen opnieuw tegen het licht te houden. Al was het alleen maar om de in het verleden gemaakte keuzen te kunnen herbevestigen. In de Visie op de regionale waterkeringen 2016 (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2017) is dit onderkend en is de herbeschouwing van de veiligheidsbenadering als doelstelling geformuleerd. In het Programmaplan van het Onderzoeksprogramma Regionale Keringen (Hoogendoorn & Biemans, 2020) zijn acties opgenomen om aan deze doelstelling invulling te geven. In de Visie is opgenomen dat wordt gestart met het uitvoeren van gebiedspilots. Op deze manier wordt concreet inzicht verkregen in de mogelijke meerwaarde van actualisatie van de veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen.

Het voorliggende rapport doet verslag van de gebiedspilot die is uitgevoerd voor de polder Heerhugowaard. Het doel van deze gebiedspilot was om:

- Inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van de overstromingskansbenadering op regionale waterkeringen;
 - De karakteristieken van de overschrijdingskansbenadering en de overstromingskansbenadering naast elkaar te presenteren;
 - De meerwaarde en aandachtspunten van de overstromingskansbenadering te benoemen.
- Hierbij is gekozen voor een brede benadering, door te kijken naar meerdere aspecten zoals normeren, toetsen, nemen van maatregelen en in stand houden van de regionale waterkeringen.

De pilot is begeleid door een klankbordgroep met vertegenwoordigers van Hollands Noorderkwartier. De klankbordgroep was breed samengesteld: programmamanager, technisch manager, manager kadverbetering, assetmanager, beleidsadviseur, geotechnisch adviseur en adviseur beheer. Voor de klankbordgroep zijn drie workshops georganiseerd. Ook is de concept-rapportage met de klankbordgroep besproken.

Het rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 bevat een beschrijving van polder Heerhugowaard. In hoofdstuk 3 wordt toelichting gegeven over de overschrijdingskansbenadering en de toepassing daarvan op de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Hoofdstuk 4 gaat over de toepassing van de overstromingskansbenadering op de regionale waterkeringen rond de polder Heerhugowaard. Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen. Het rapport wordt afgesloten met een overzicht van relevante literatuur en met een aantal bijlagen met technische achtergrondinformatie.

In verschillende onderdelen van dit rapport wordt eerst toelichting gegeven over een methode en wordt daarna toegelicht welke keuzes zijn gemaakt bij de toepassing van die methode binnen de

gebiedspilot Heerhugowaard. Om het onderscheid tussen methode en toepassing zo herkenbaar mogelijk te maken, zijn de teksten over de methode steeds in blauw weergegeven.

2. Beschrijving polder Heerhugowaard

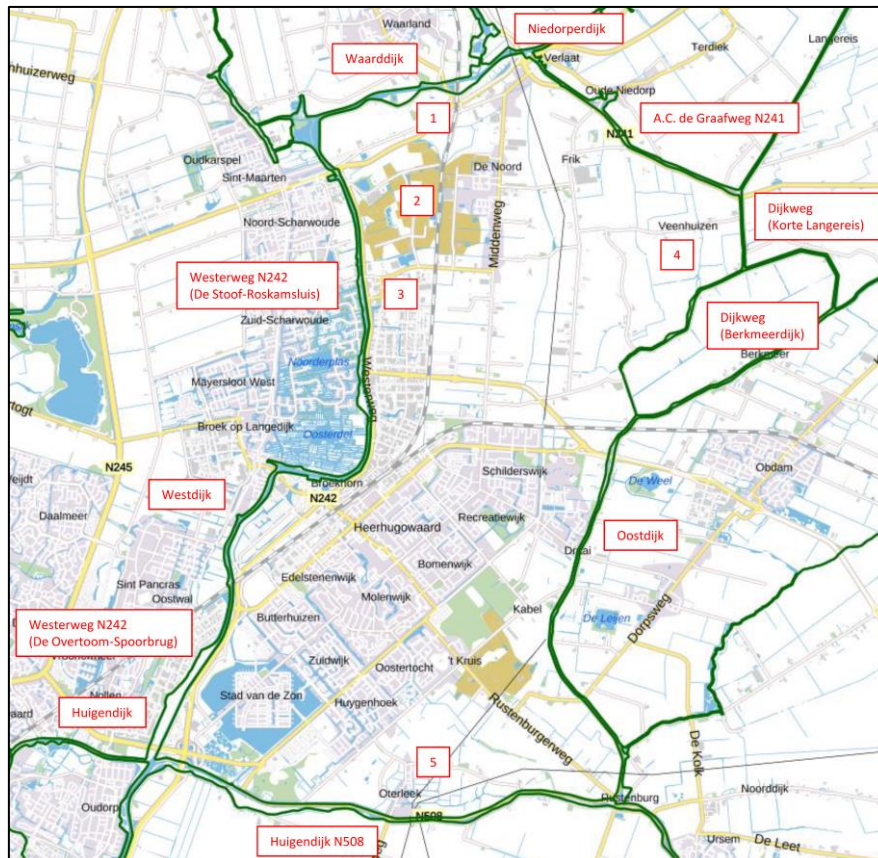
2.1 Inleiding

De polder Heerhugowaard bevindt zich ten noordoosten van Alkmaar. De polder is in 1631 drooggevallen. Enkele delen behoren niet tot deze droogmakerij, maar zijn polders die al eerder bestonden. Dit zijn de Smuigelpolder (aanduiding 1 in Figuur 2), de Noord-Scharwouderpolder (aanduiding 2 in Figuur 2), de Zuid-Scharwouderpolder (aanduiding 3 in Figuur 2), de polder Veenhuizen (aanduiding 4 in Figuur 2) en de polder Oterleek (aanduiding 5 in Figuur 2) (Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, 1981; Komen, 2016, 2017; Van der Veen et al., 2012).

Achtereenvolgens komen in dit hoofdstuk aan de orde: het landgebruik in polder Heerhugowaard (paragraaf 2.2), de aanwezige maaiveldhoogten (paragraaf 2.3), het regionale watersysteem (paragraaf 2.4), de boezemkaden (paragraaf 2.5) en de bodemopbouw (paragraaf 2.6).

2.2. Landgebruik

De polder Heerhugowaard heeft een oppervlakte van iets meer dan 4.000 ha. Het centrale deel en het zuidwestelijke deel hebben een stedelijke functie: de polder Heerhugowaard heeft zo'n 57.000 inwoners. Wat verder naar het noorden bevindt zich een bedrijventerrein. In het noordwesten en ook in het zuidoosten van de polder is glastuinbouw aanwezig. Voor het overige deel wordt de polder gebruikt voor veeteelt of akkerbouw. Dit is met name het geval in het noordoosten en in het zuidoosten. Figuur 2 toont de topografie van polder Heerhugowaard, samen met het omliggende stelsel van waterkeringen.



Figuur 2: Topografie polder Heerhugowaard, inclusief stelsel van waterkeringen, met benaming en ligging historische polders (<https://www.pdok.nl/viewer/> met toevoegingen)

2.3 Maaiveldhoogten

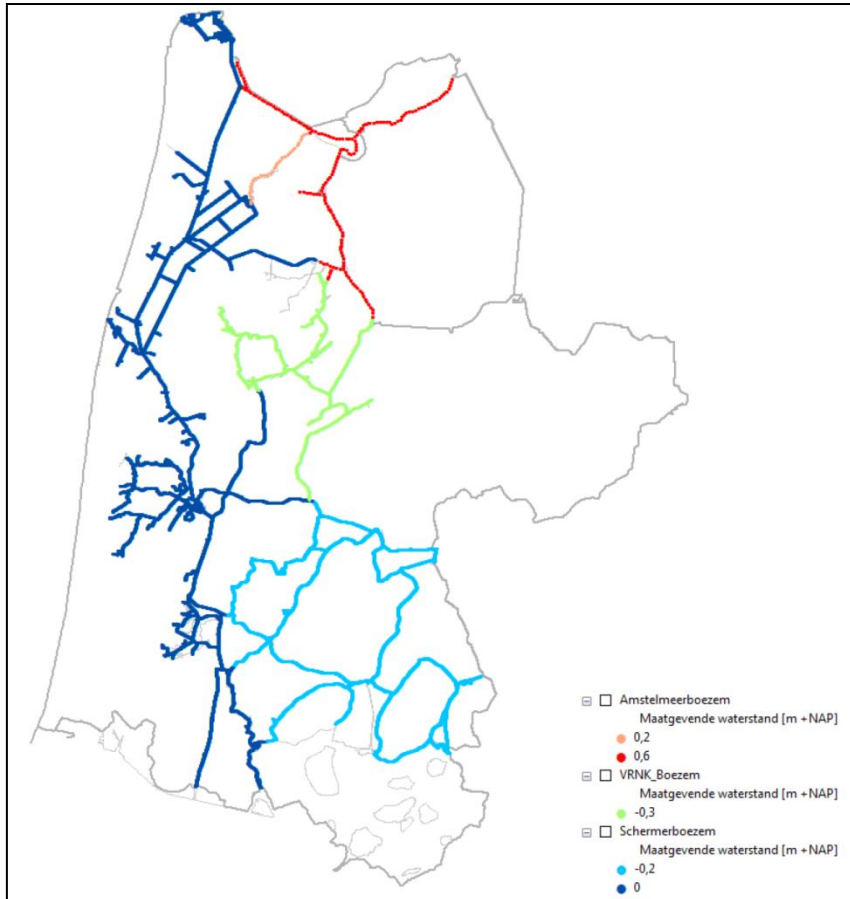
De maaiveldhoogte binnen polder Heerhugowaard varieert tussen NAP – 1,0 m en NAP – 3,3 m; de gemiddelde maaiveldhoogte is ongeveer NAP – 2,6 m. Figuur 3 geeft een beeld van de aanwezige maaiveldhoogten.



Figuur 3: Maaiveldhoogten polder Heerhugowaard (<https://www.ahn.nl/ahn-viewer>)

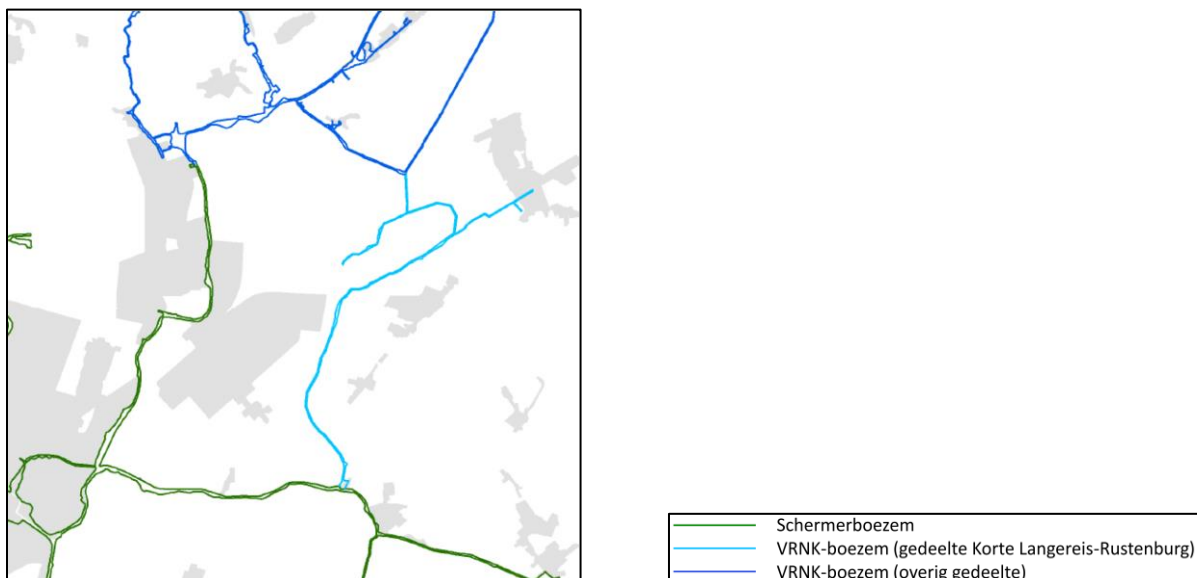
2.4 Regionaal watersysteem

Binnen het beheergebied van Hollands Noorderkwartier zijn meerdere boezemstelsels aanwezig. Dit zijn gecontroleerde watersystemen. Om falen van de langs de boezemstelsels aanwezige boezemkaden te voorkomen, wordt bij het bereiken van een bepaalde boezemwaterstand ('het maalstoppeil') een maalstop afgekondigd, waarna geen water uit de polder meer mag worden uitgeslagen op het boezemstelsel. Doordat er relatief weinig vrij afwaterend gebied is, zijn deze maximale boezemwaterstanden goed te beheersen. Omdat bij het afkondigen van een maalstop wateroverlast in de polders kan ontstaan, streeft Hollands Noorderkwartier ernaar dat deze situatie niet te vaak voorkomt: globaal niet vaker dan gemiddeld 1 keer per 100 jaar. De aanwezige boezemstelsels worden weergegeven in Figuur 4, samen met de maatgevende waterstand (het benodigde 'toetspeil') bij toepassing van de vigerende veiligheidsbenadering) voor toetsronde 2024. De maatgevende waterstand kan afwijken van het maalstoppeil.



Figuur 4: Boezemstelsels Hollands Noorderkwartier, met maatgevende waterstanden voor toetsronde 2024 (in geval van compartimentering van de Schermerboezem)

Voor de boezemkaden rond polder Heerhugowaard zijn twee boezemstelsels van speciaal belang. Dit zijn de Schermerboezem en de Vereenigde Raakmaats- en Nedorperkogge boezem (of korter: de VRNK-boezem). Deze VRNK-boezem kende tot enkele jaren geleden twee compartimenten met een onderling iets verschillend maalstoppeil (inmiddels geldt voor de gehele VRNK-boezem hetzelfde maalstoppeil: NAP - 0,3 m). De toenmalige boezemstelsels rond polder Heerhugowaard zijn te zien in Figuur 5.



Figuur 5: Boezemstelsel rondom polder Heerhugowaard (Kwakman & Haanstra, 2015)

De streefpeilen (nagestreefde waterstand in de boezemstelsels onder dagelijkse omstandigheden) en de maalstoppeilen/maalstopwaterstanden worden getoond in Tabel 1.

Boezemstelsel	Streefpeil ² [NAP+m]	Maalstop- waterstand ³ [NAP+m]
Schermerboezem	-0,50	0,00
VRNK-boezem (gedeelte Korte Langereis-Rustenburg)	-0,60	-0,25
VNRK-boezem (overig gedeelte)	-0,60	-0,30

Tabel 1: Streefpeilen en maalstoppeilen boezemstelsels rondom polder Heerhugowaard (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 2014)

Tabel 1 laat zien dat de marges in het boezempeilbeheer beperkt zijn: de toelaatbare boezempeilstijging bedraagt slechts enkele decimeters.

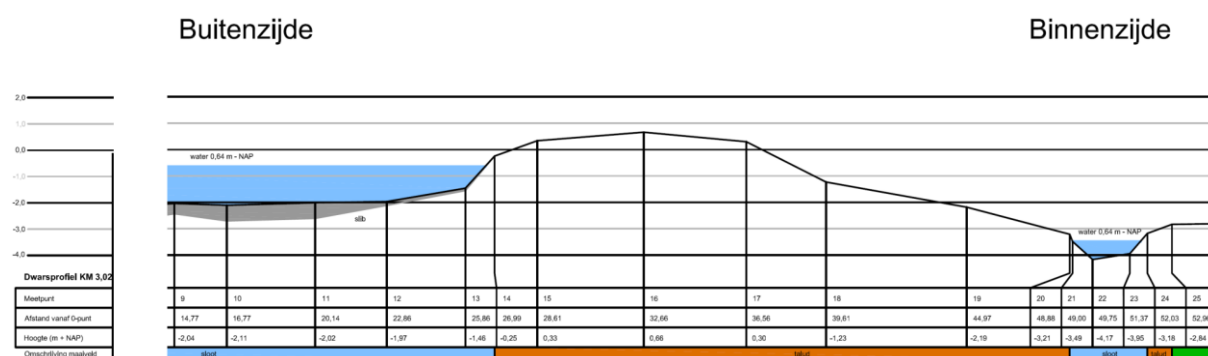
In relatie tot de toetsing op veiligheid van boezemkaden, wordt in plaats van het maalstoppeil ook wel gesproken over de maatgevende waterstand of het maatgevend boezempeil.

De Schermerboezem heeft (zonder compartimentering) bij het maalstoppeil een totale oppervlakte van 1.957 ha (N. Postma, persoonlijke communicatie, 3 februari 2020). De totale oppervlakte van de VRNK-boezem bedraagt bij het maalstoppeil 254 ha (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 2014).

2.5 Boezemkaden

De totale lengte van de boezemkaden rond polder Heerhugowaard bedraagt 32 km. De in Figuur 2 aangeduide boezemkaden hadden de volgende karakteristieken (Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, 1981; Kwakman & Haanstra, 2015; Van den Herik, 2015; Van der Giessen, 2014), (na 2014 zijn voor enkele trajecten versterkingen uitgevoerd):

- De **Oostdijk** heeft een kruinbreedte van ongeveer 7,5 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte varieert van NAP + 0,4 m tot NAP + 2,0 m. Het binnentalud heeft een helling die varieert van 1:2 tot 1:2,5. Figuur 6 toont een dwarsprofiel.



Figuur 6: Dwarsprofiel Oostdijk (dijksectie 3) (Kwakman & Haanstra, 2015)

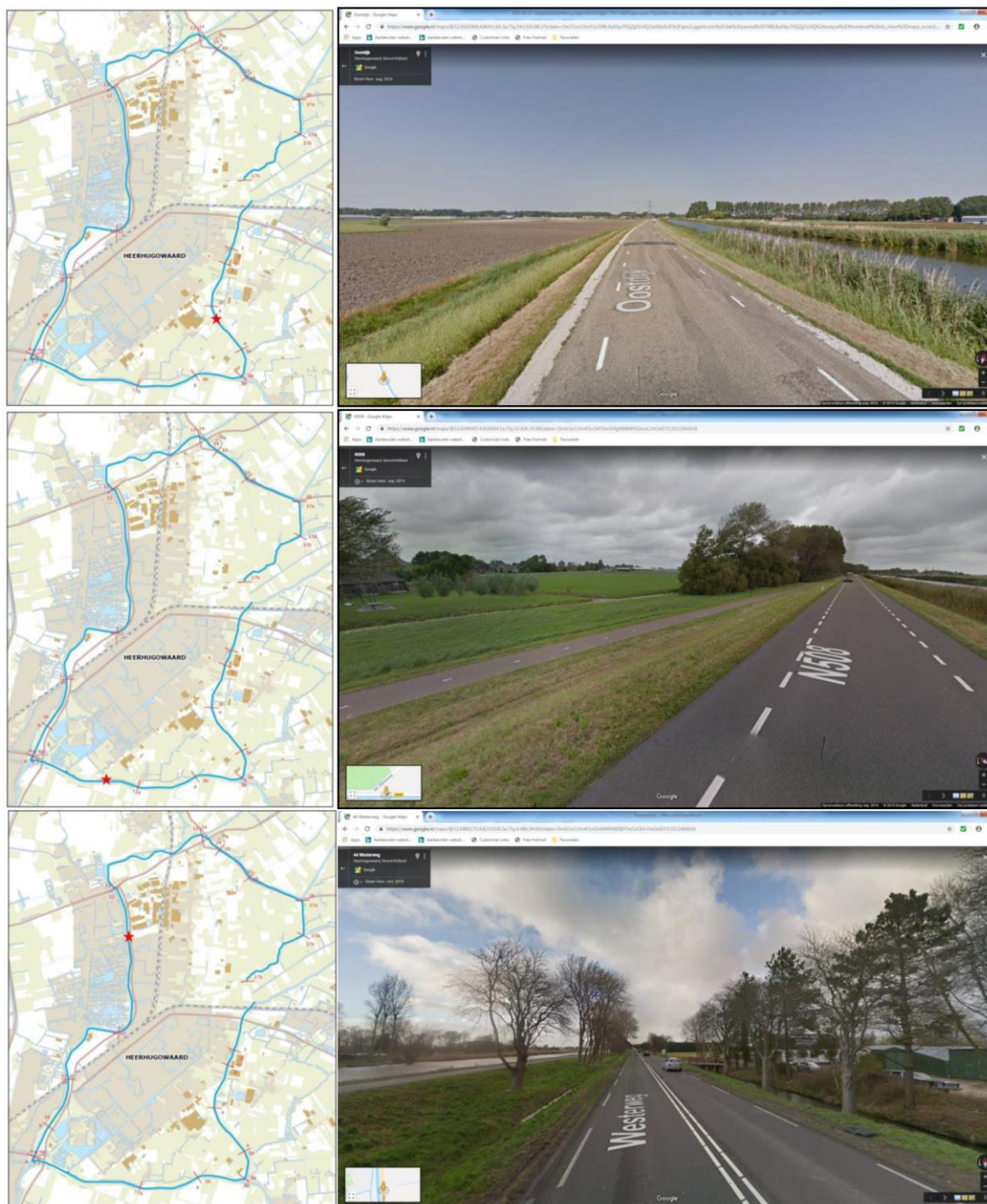
- De **Huigendijk N508** heeft een kruinbreedte die varieert van 7,5 m tot 8,5 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte varieert van NAP + 0,2 m tot NAP + 0,5 m. Het binnentalud heeft een helling die varieert van 1:2 tot 1:2,5.

² Vastgelegd in peilbesluit.

³ Genoemd in toelichting bij peilbesluit; inmiddels geldt ook voor het gedeelte Korte Langereis-Rustenburg een maalstoppeil van NAP - 0,3 m.

- De **Huigendijk** heeft een kruinbreedte die varieert van 2,5 m tot 4,5 m. In een deel van het tracé bevindt zich op de kruin een asfaltweg, in een ander deel bevindt de asfaltweg zich op een binnenberm en nog een ander deel bestaat uit een groene kade. De kruinhoogte varieert van NAP + 0,4 m tot NAP + 0,6 m. Het binnentalud heeft een helling die varieert van 1:2,5 tot 1:3.
- De **Westerweg N242** heeft een kruinbreedte van ongeveer 3 m. Op de kruin bevindt zich een fietspad. De kruinhoogte ligt rond NAP + 0,4 m. Het binnentalud heeft een helling van ongeveer 1:2.
- De **Westdijk** heeft een kruinbreedte die varieert van 5 m tot 5,5 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte varieert van NAP + 0,4 m tot NAP + 0,6 m. Het binnentalud heeft een helling die varieert van 1:2 tot 1:2,5.
- De **Waarddijk** heeft een kruinbreedte van ongeveer 5 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte varieert van NAP + 0,3 m tot NAP + 0,6 m. Het binnentalud heeft een helling van ongeveer 1:2,5.
- De **Niedorperdijk** heeft een kruinbreedte van ongeveer 10 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte ligt rond NAP + 0,6 m. Het binnentalud heeft een helling van ongeveer 1:3.
- De **A.C. de Graafweg N241** heeft een kruinbreedte die varieert van 10 m tot 15 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte varieert van NAP + 0,9 m tot NAP + 1,0 m. Het binnentalud heeft een helling die varieert van 1:2 tot 1:3.
- De **Dijkweg (Korte Langereis)** heeft een kruinbreedte van ongeveer 3,5 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte ligt rond NAP + 0,2 m. Het binnentalud heeft een helling van ongeveer 1:2,5.
- De **Dijkweg (Berkmeerdijk)** heeft een kruinbreedte van ongeveer 3,5 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg. De kruinhoogte varieert van NAP + 0,2 m tot NAP + 0,3 m. Het binnentalud heeft een helling van ongeveer 1:2.

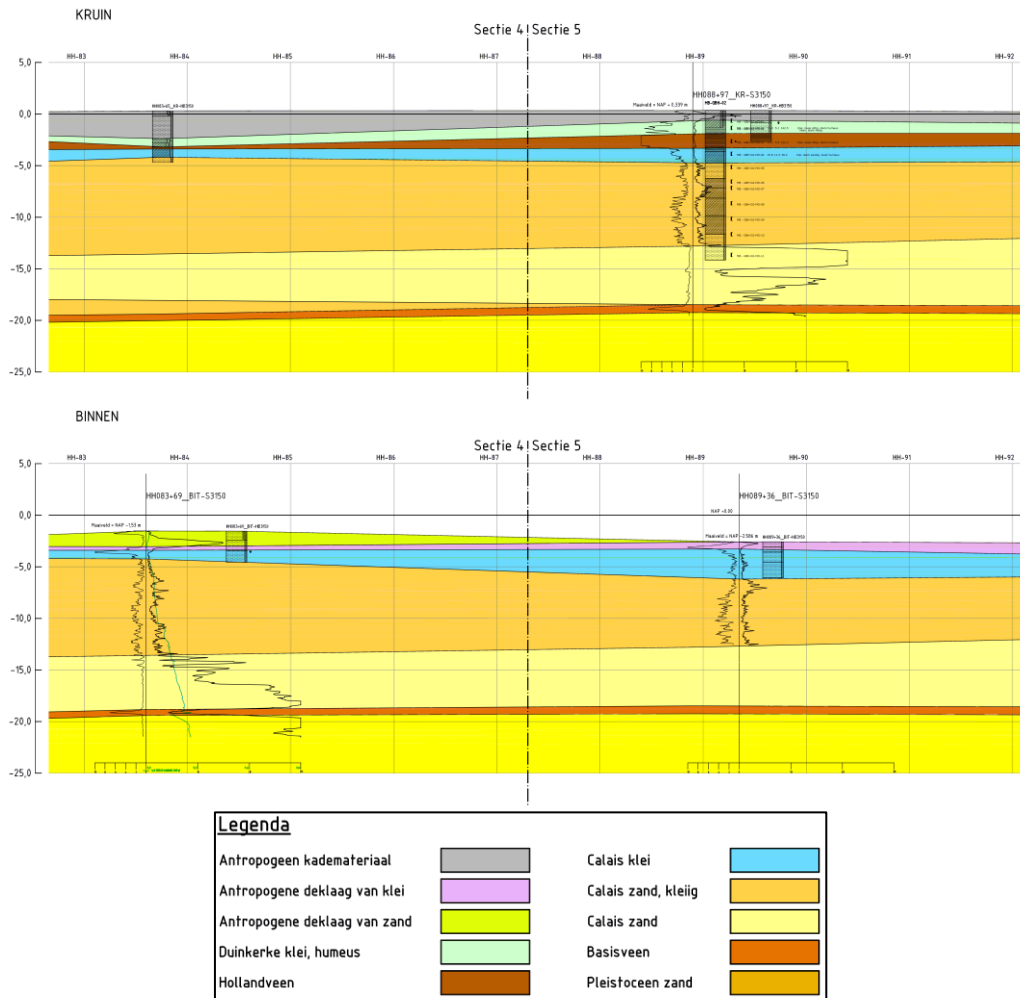
Figuur 7 geeft een beeld van enkele boezemkaden rond polder Heerhugowaard.



Figuur 7: Beelden van enkele boezemkaden rond polder Heerhugowaard, met van boven naar beneden: de Oostdijk, de Huygendijk N508 en de Westerweg N242, gedeelte De Stoof-Roskamsluis (<https://www.google.nl/maps/>)

2.6 Bodemopbouw

Op basis van uitgevoerd grondonderzoek (Bijlsma & Tenhage, 2011) is inzicht verkregen in de bodemopbouw ter plaatse van de kruin van de boezemkaden en ter plaatse van de binnenteen. In Figuur 8 wordt een gedeelte van het geotechnisch lengteprofiel getoond.



Figuur 8: Geotechnisch lengteprofiel gedeelte Oostdijk (nabij overgang dijksectie 4 en 5) (Bijlsma & Tenhage, 2011)

De globale grondopbouw bestaat van boven naar onderen uit:

- Anthropogeen kademateriaal bestaande uit klei en zand (ter plaatse van de kruin);
- Anthropogene deklagen van zand en klei (in het achterland);
- Humeuze klei (afzetting van Duinkerke) (ter plaatse van de kruin; in het achterland grotendeels afwezig);
- Hollandveen (ter plaatse van de kruin; in het achterland grotendeels afwezig);
- Zandige klei (afzetting van Calais);
- Wadzandpakket, met afwisselend kleiig zand en zand (afzetting van Calais);
- Basisveen (soms weg geërodeerd);
- Pleistoceen zand.

In totaal is het Holocene pakket ongeveer 15 m tot 25 m dik.

3. Overschrijdingskansbenadering

3.1. Inleiding

De overschrijdingskansbenadering is de vigerende veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen.

Achtereenvolgens komen in dit hoofdstuk aan de orde: de veiligheidsbenadering (paragraaf 3.2), het vereiste beschermingsniveau (paragraaf 3.3), het toetsen op veiligheid (paragraaf 3.4) en de uit de toetsing voortvloeiende maatregelen (paragraaf 3.5).

3.2 Veiligheidsbenadering

Bij de overschrijdingskansbenadering is het onderliggende principe dat een regionale waterkering standzeker is bij het optreden van de maatgevende belasting. Met andere woorden: een regionale waterkering moet de maatgevende belasting veilig kunnen keren. Veelal bestaat de maatgevende belasting uit het optreden van de maatgevende waterstand; zie Figuur 9.



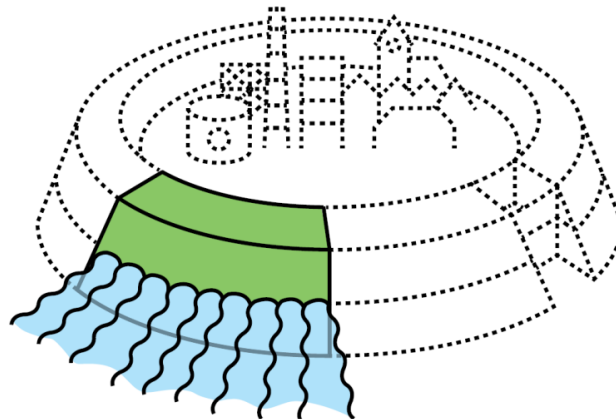
Figuur 9: Veilig keren van de maatgevende waterstand

De maatgevende waterstand is daarbij de waterstand die hoort bij de veiligheidsnorm die voor een regionale waterkering geldt (of anders geformuleerd: de veiligheidsnorm wordt uitgedrukt in de overschrijdingsfrequentie van de waterstand die door de regionale waterkering veilig moet worden gekeerd). Overigens kunnen ook andere belastingen, zoals een verhoging van de freatische lijn in de regionale waterkering als gevolg van extreme neerslag, leiden tot een maatgevende belasting.

De aanduiding ‘veilig keren’ vraagt nog om verdere toelichting. Dit betekent niet dat er bij het optreden van de maatgevende hydraulische belasting geen enkele aantasting of vervorming van de regionale waterkering mag ontstaan, maar wel dat de regionale waterkering zijn hoofdfunctie (het keren van het water van het regionale watersysteem) ondanks deze aantastingen en vervormingen moet blijven vervullen. Deze eis brengt uiteraard wel met zich mee dat de aantastingen en vervormingen van beperkte omvang moeten blijven.

3.3 Vereist beschermingsniveau

Bij de overschrijdingskansbenadering heeft de veiligheidsnorm betrekking op een bepaald dijkvak (scherper geformuleerd: op een relevante doorsnede binnen dit dijkvak); zie Figuur 10.



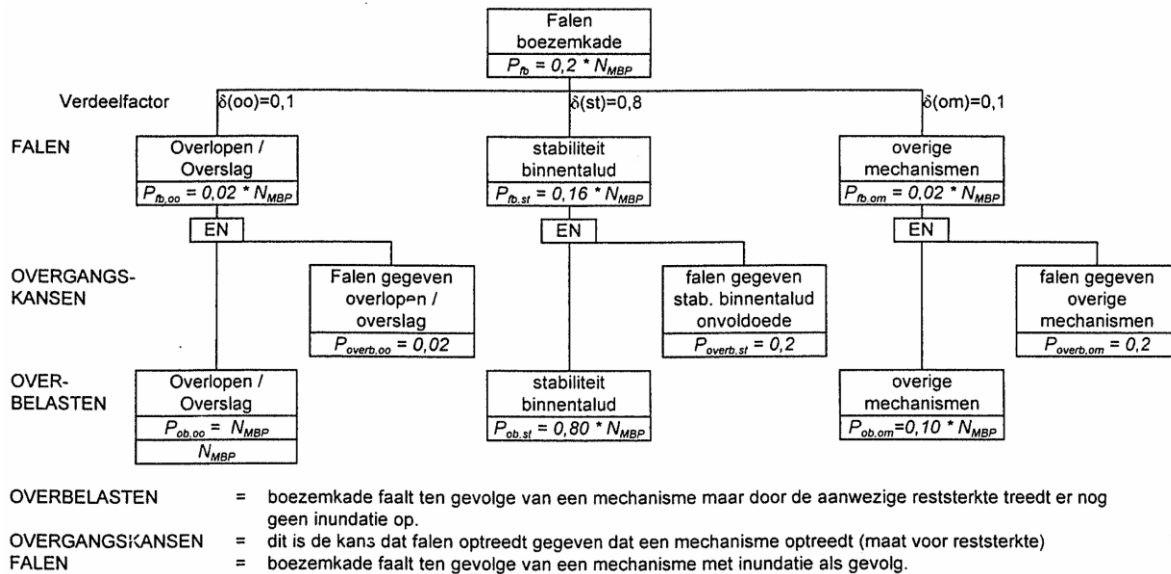
Figuur 10: Overschrijdingskansbenadering richt zich op dijkvakken (Veiligheid Nederland in Kaart, 2011)

Verder is de veiligheidsnorm bij de overschrijdingskansbenadering uitsluitend gerelateerd aan de hydraulische belasting ('de maatgevende waterstand'); de sterkte-eigenschappen van de regionale waterkering komen pas aan de orde bij toepassing van de technische leidraden die zijn opgesteld in het kader van de overschrijdingskansbenadering.

Provinciale Staten zijn bevoegd gezag voor het aanwijzen en normeren van regionale waterkeringen die in beheer zijn bij een waterschap. De boezemkaden rond polder Heerhugowaard zijn als regionale waterkering aangewezen met de inwerkingtreding in 2006 van de Verordening waterkering West-Nederland (Provincie Utrecht et al., 2006). In 2009 is deze verordening ingetrokken en opgevolgd door enkele andere verordeningen. Voor de boezemkaden rond polder Heerhugowaard was in dat verband de Waterverordening Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (Provincie Noord-Holland, 2009) relevant. Inmiddels geldt de Omgevingsverordening NH2020 (Provincie Noord-Holland, 2020).

In de bovenvermelde verordeningen zijn als vereist beschermingsniveau zogenaamde toetsnormen vastgelegd. Deze toetsnormen zijn uitgedrukt in vijf veiligheidsklassen. Daarbij komt veiligheidsklasse III overeen met de eisen uit het systematisch kade-onderzoek, dat in de periode 1969 tot en met 1992 in opdracht van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) is uitgevoerd. Het Interprovinciaal Overleg (IPO) heeft in 1999, bij de introductie van de toetsnormen, op beleidsmatige gronden gekozen voor dit principe van 'geen trendbreuk' (Nieuwjaar, 2020; Van der Meer et al., 1999). Dit om te voorkomen dat de boezemkaden bij de eerstkomende toetsing grootschalig zouden worden afgekeurd.

Om een vergelijking te kunnen maken tussen het risico van overstrooming door falen van een boezemkadevak en het risico van overstrooming door falen van een primaire waterkering, is bij de afleiding van de toetsnormen een faalkansverdeling voor boezemkaden afgeleid; zie Figuur 11.



Figuur 11: Faalkansverdeling voor boezemkaden (Van der Meer et al., 1999)

In de bovenstaande faalkansverdeling zijn de waarden van de overgangskansen tussen overbelasten en falen (maat voor reststerkte) en de waarden van de verdeelfactoren (waarmee eisen worden opgelegd aan de vereiste faalkans voor ieder faalmechanisme) zodanig gekozen dat wordt aangesloten bij de eisen uit het systematisch kade-onderzoek.

Uit destijds geanalyseerde cases kwam naar voren dat het risico (kans x gevolg) na falen van een boezemkade gemiddeld circa 10 keer groter is dan het risico na falen van een primaire waterkering. Daarom werden in 1999 aanvullend ook ontwerpnormen geïntroduceerd. Die waren bedoeld voor het dimensioneren van de versterking van een afgekeurde boezemkade. De ontwerpnorm moest daarbij worden gebaseerd op een economische optimalisatie per polder (minimalisering van de kosten van maatregelen plus de kans op schade door kadebreuk). Het principe van de ontwerpnormen heeft geen doorvertaling gevonden in de genoemde provinciale verordeningen.

Om recht te doen aan het gegeven dat het landgebruik van polder tot polder sterk kan verschillen, is door het IPO differentiatie aangebracht in de toetsnormen, door onderscheid te maken in de eerdergenoemde vijf veiligheidsklassen. Een veiligheidsklasse is hierbij gekoppeld aan de grootte van de directe economische gevolgschade door overstroming. Tabel 2 toont per veiligheidsklasse de samenhang tussen de (gehanteerde bandbreedte voor de) gevolgschade en de te normeren overschrijdingskans van de maatgevende waterstand.

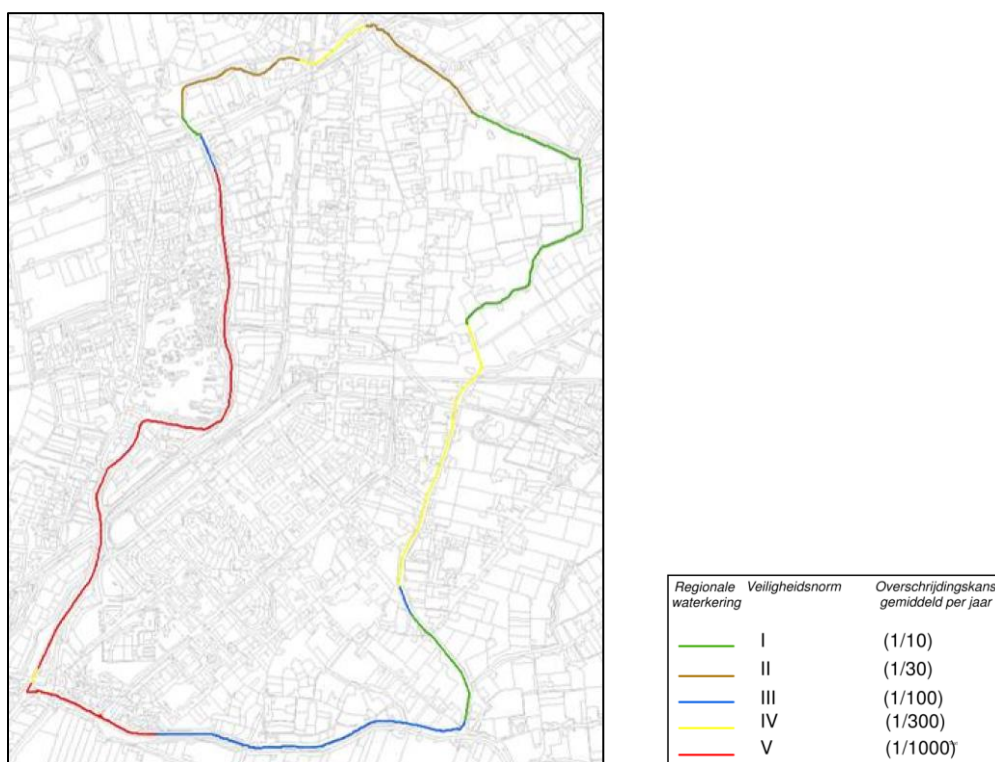
Veiligheidsklasse	Directe economische gevolgschade [M€, prijspeil 2019]	Overschrijdingskansnorm ⁴ [1/jaar]
I	< 12,5	1/10
II	12,5 – 40	1/30
III	40 – 125	1/100
IV	125 – 400	1/300
V	> 400	1/1.000

Tabel 2: Overschrijdingskansnorm per veiligheidsklasse (Nieuwjaar, 2020)

⁴ De in deze kolom vermelde getalswaarden behoren exclusief bij de toestand 'overbelasten' voor het faalmechanisme 'overlopen/overslag' (het vakje linksonder in Figuur 11). Bijlage 11 bevat een beschouwing over de vereiste faalkans voor het faalmechanisme 'stabiliteit binnentalud'.

Door Hollands Noorderkwartier is bij het berekenen van de gevolgschade niet alleen gekeken naar schade in de overstromde polder (de standaard-werkwijze), maar is ook rekening gehouden met maatregelen om de gevolgen van een overstroming te beperken en ook met schade aan buitentaluds als gevolg van val van de boezemwaterstand. De grootte van het debiet door een bres in een boezemkade is bepalend voor de uitvoerbaarheid van maatregelen om deze bres te dichten. Direct na een kadebreuk is het instroomdebiet door de bres erg hoog. Als gevolg van het vullen van de polder en het instellen van een verhanglijn in de boezem, neemt het debiet vervolgens af. Met analyses is onderbouwd dat maatregelen om de bres te dichten binnen 48 uur kunnen worden uitgevoerd (Werkgroep Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier, 2004).

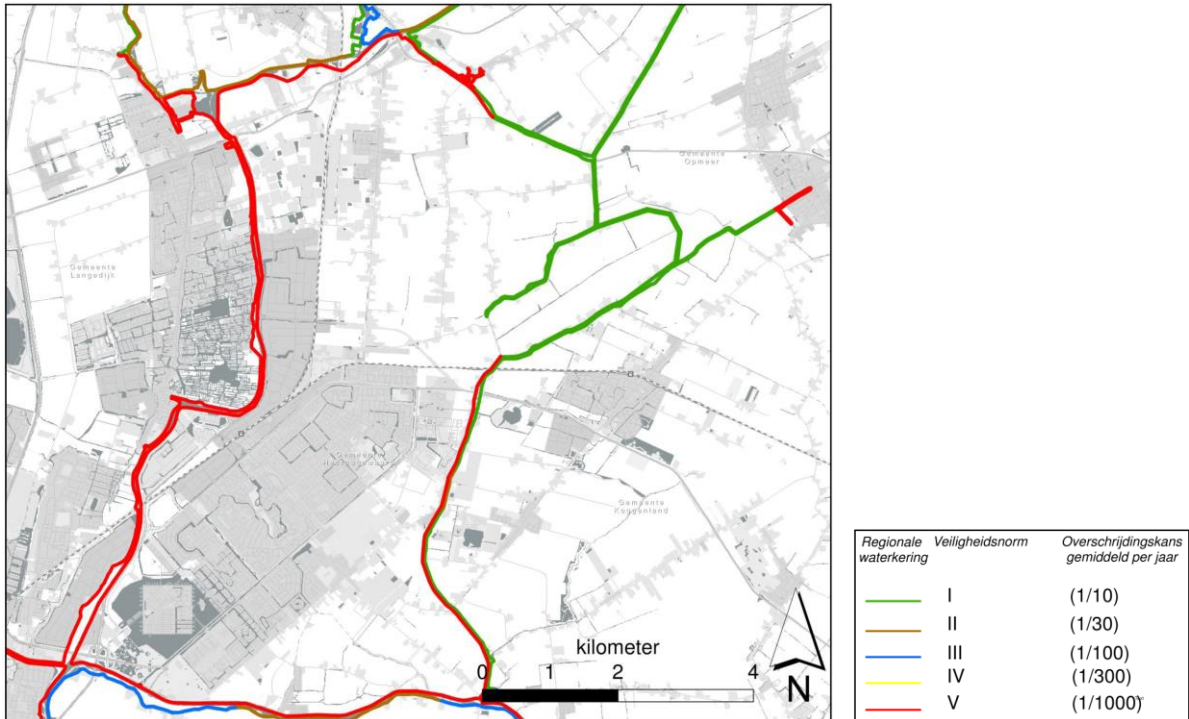
Op basis van overstromingsanalyses, rekening houdend met het dichten van een bres binnen 48 uur, en met meenemen van de compartimenteringskering tussen polder Veenhuizen (aan de noordoostzijde) en de rest van polder Heerhugowaard, zijn de veiligheidsklassen afgeleid zoals weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12: Veiligheidsklassen op basis van gevolgschade na 48 uur

Vanuit een meer bestuurlijke overweging is vervolgens door Hollands Noorderkwartier aan boezemkadevakken die grenzen aan stedelijke gebied met een oppervlak van minimaal 10 ha de strengste veiligheidsklasse (veiligheidsklasse V) toegekend. In 10 ha stedelijk gebied staan gemiddeld 200 woningen, waardoor gesproken kan worden van een woonwijk (Werkgroep Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier, 2004). Bij de toepassing is zelfs de ondergrens van 10 ha niet heel strikt gehanteerd.

Figuur 13 toont de veiligheidsnormering zoals deze door de provincie Noord-Holland in 2013 is vastgesteld, op basis van de uitgangspunten en overwegingen van Hollands Noorderkwartier.



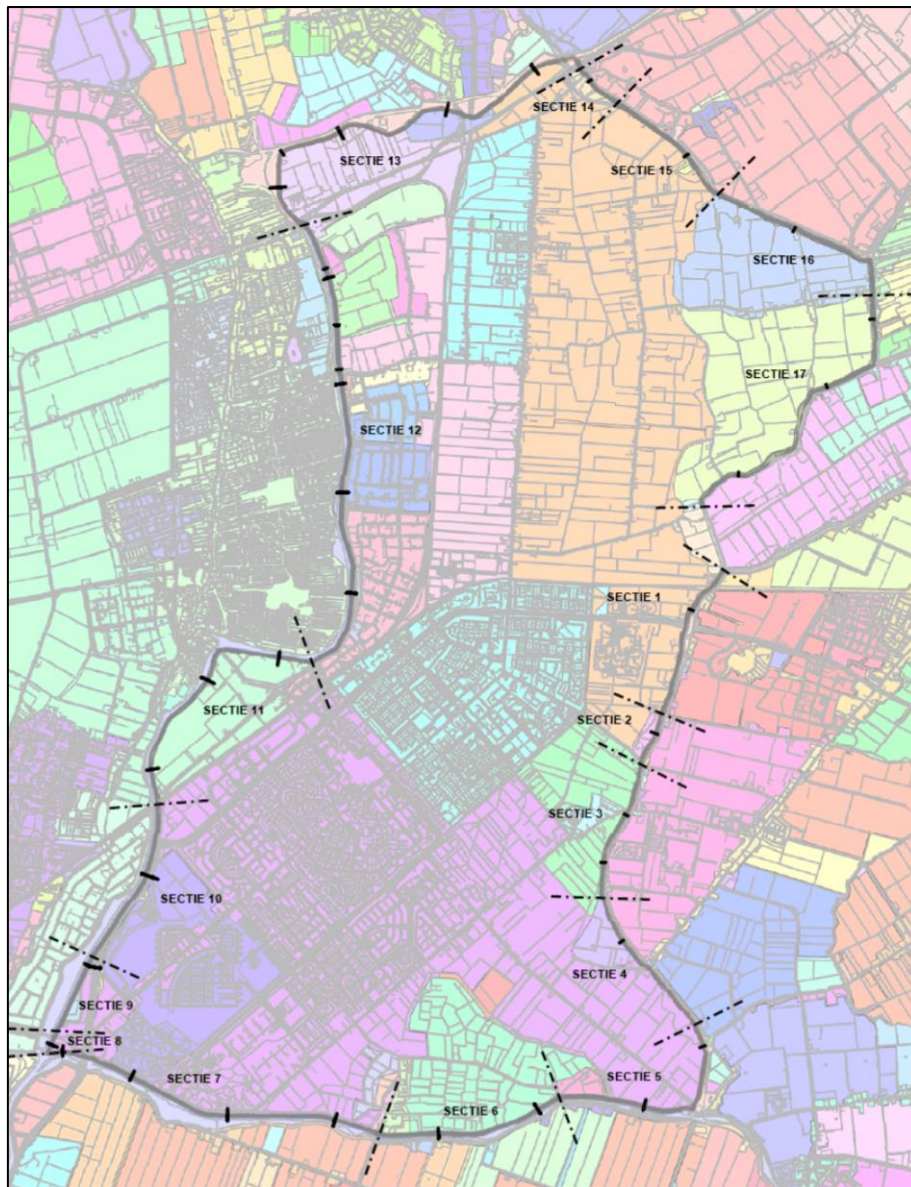
Figuur 13: Vastgestelde normering regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard (Provincie Noord-Holland, 2013)

3.4. Toetsen op veiligheid

Voor de toetsing op veiligheid is de regionale waterkering rond polder Heerhugowaard door Hollands Noorderkwartier in 2011 opgedeeld in dijksecties (Bijlsma & Tenhage, 2011). Een dijksectie kan daarbij worden beschouwd als een dijkvak zoals dat in paragraaf 3.1 aan de orde is gekomen. De opdeling in dijksecties is gebeurd op grond van variaties in:

- de geometrie van dijklichaam en achterland;
- het polderpeil;
- de (globale) grondopbouw, en
- de genormeerde veiligheidsklasse.

Het resultaat van deze opdeling is te zien in Figuur 14: er zijn 17 dijksecties onderscheiden.



Figuur 14: Dijksecties regionale waterkering rond polder Heerhugowaard (Bijlsma & Tenhage, 2011)

Bij de toetsing op veiligheid zijn door Hollands Noorderkwartier in 2011 en 2015 als maatgevende boezemwaterstand de maalstoppeilen van de betreffende boezemstelsels gehanteerd. Hierbij is geen onderscheid gemaakt naar de genormeerde veiligheidsklassen (Bijlsma & Tenhage, 2011; Kwakman & Haanstra, 2015), waardoor de gehanteerde waarden iets conservatiever zijn. De gebruikte maalstoppeilen staan vermeld in Tabel 1.

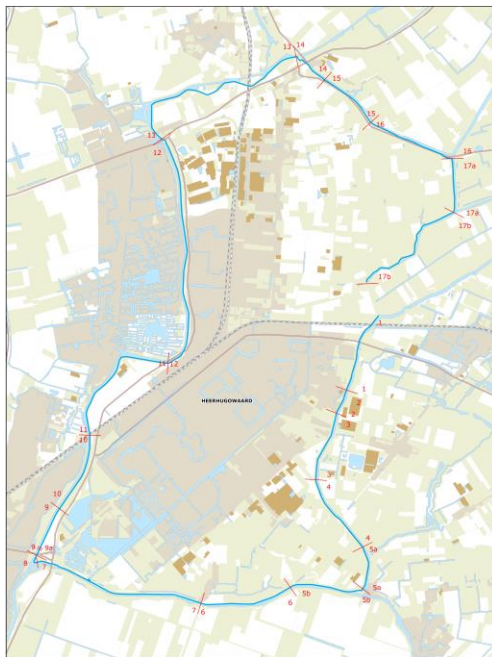
Bij de toetsing op veiligheid is door Hollands Noorderkwartier in 2011 voor het faalmechanisme 'overlopen-overslag' gewerkt met minimaal vereiste kruinhoogten. De minimaal vereiste kruinhoogte wordt daarbij gevonden uit de som van de maatgevende boezemwaterstand en een minimaal vereiste waakhoogte. De door Hollands Noorderkwartier gehanteerde minimaal vereiste waakhoogten zijn (Bijlsma & Tenhage, 2011):

- Verharde kade: 0,10 m
- Onverharde kade: 0,20 m
- Kade gelegen aan meer: 0,40 m

Zoals beschreven in paragraaf 2.5, hebben verreweg de meeste regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard een asfaltweg op de kruin. Deze trajecten worden gekarakteriseerd als ‘verharde kaden’. De resterende trajecten worden gekarakteriseerd als ‘onverharde kaden’.

Zoals ook blijkt uit de in paragraaf 2.5 opgenomen beschrijving van de aanwezige kruinhoogten, leidt het faalmechanisme ‘overlopen-overslag’ voor alle dijksecties tot het veiligheidsoordeel ‘voldoende’.

Voor de grondmechanische faalmechanismen is bij de toetsing op veiligheid in 2015 het veiligheidsoordeel gevonden zoals weergegeven in Figuur 15.



Sectie [-]	Van dijkspaal	Tot dijkspaal	STPH VO	STBI VO	STBU VO
1	HH039	HH054+35m	V	V	O
2	HH054+35m	HH059	V	V	V
3	HH059	HH072+45m	V	V	O
4	HH072+45m	HH087+30m	V	O	O
5	HH087+30m	HH108+35m	V	O	V
6	HH108+35m	HH126+25m	V	O	V
7	HH126+25m	HH158	V	O	O
8	HH158	HH160	V	O	O
9	HH160	HH169+55m	V	V	O
9a	HH161+20	HH161+55	V	O	O
10	HH169+55m	HH184+55m	V	V	V
11	HH184+55m	HH209+80m	V	O	V
12	HH209+80m	HH254	V	V	V
13	HH254	HH291	V	V	V
14	HH291	HH298+30m	V	V	V
15	HH298+30m	HH310+40m	V	V	V
16	HH310+40m	HH326	V	V	V
17	HH000	HH032+95m	V	V	V

Figuur 15: Resultaat veiligheidsoordeel voor de grondmechanische faalmechanismen (Kwakman & Haanstra, 2015)

Bijlage 1 bevat achtergrondinformatie over de toetsing op veiligheid voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts STBI (in Figuur 11 ‘stabiliteit binnentalud’ genoemd).

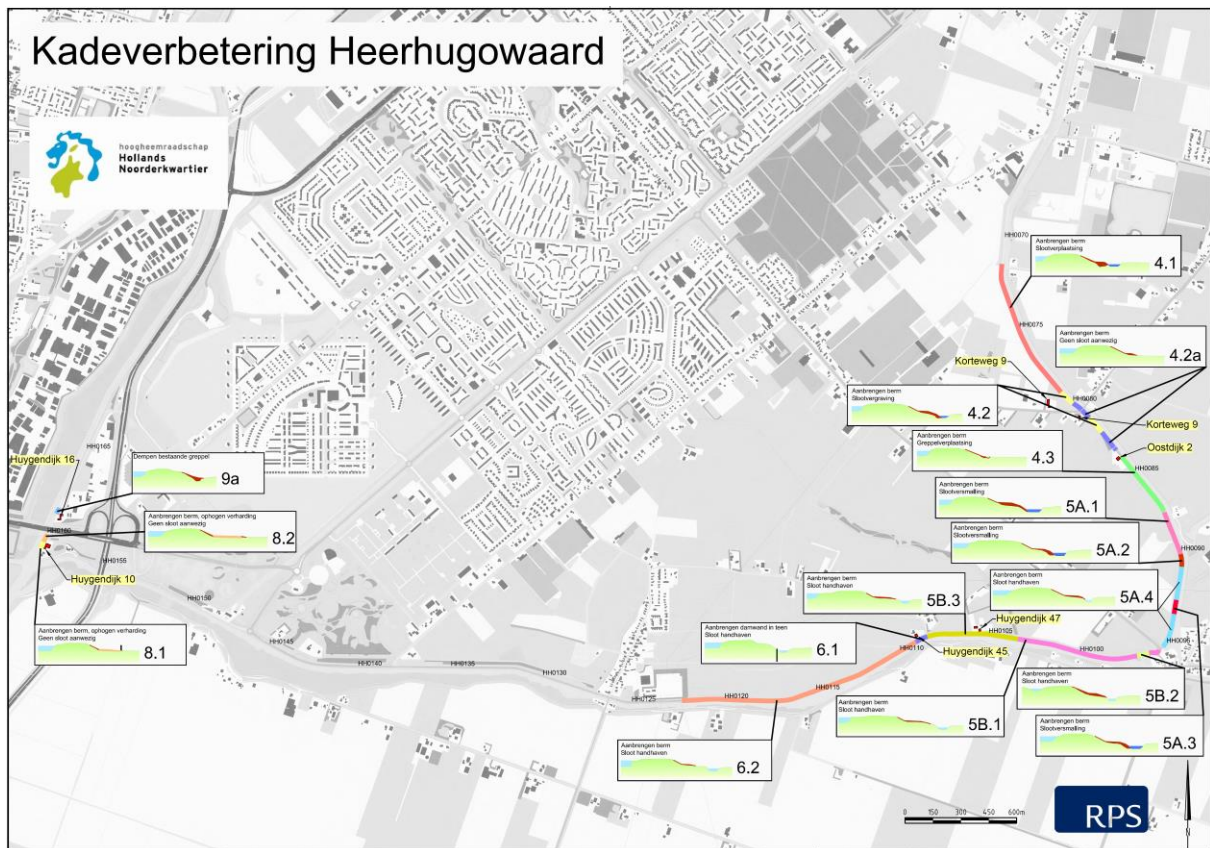
3.5 Maatregelen

Door Hollands Noorderkwartier zijn kadeverbeteringen uitgevoerd als maatregel volgend op de bij de toetsing op veiligheid gevonden scores.

In juli 2016 is een verbetering uitgevoerd van de regionale waterkering langs de Broekhornpolder (dijksectie 11) voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts (Van der Giessen, 2014).

In 2015 is het Definitief Ontwerp gereedgekomen voor de verbetering van de regionale waterkering in dijksectie 4 tot en met dijksectie 8 plus dijksectie 9a voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts (Van den Herik, 2015). Bijlage 2 bevat achtergrondinformatie over het dimensioneren van de verbetermaatregelen.

De verbetering van dijksectie 4 tot en met dijksectie 6 en van dijksectie 8 en dijksectie 9 (zie Figuur 16) is in juni 2018 afgerond.



Figuur 16: Verbetermaatregelen dijkssecties 4, 5, 6, 8 en 9a voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

De verbetering van dijkssectie 7 voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts moet (peildatum medio 2020) nog plaatsvinden.

Ook de (eventuele) verbeteringen vanwege het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts STBU zijn (peildatum medio 2020) nog niet uitgevoerd.

4. Overstromingskansbenadering

4.1. Inleiding

De overstromingskansbenadering is sinds 2017 de vigerende nieuwe veiligheidsbenadering voor primaire waterkeringen. Verkend is welke stappen nodig zijn om de overstromingskansbenadering voor primaire waterkeringen toe te passen op de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard en welke aandachtspunten daarbij naar voren komen.

In lijn met de indeling van hoofdstuk 3, komen in dit hoofdstuk achtereenvolgens aan de orde: de veiligheidsbenadering (paragraaf 4.2), het vereiste beschermingsniveau (paragraaf 4.3), het toetsen op veiligheid (paragraaf 4.4) en de uit de toetsing voortvloeiende maatregelen (paragraaf 4.5).

4.2 Veiligheidsbenadering

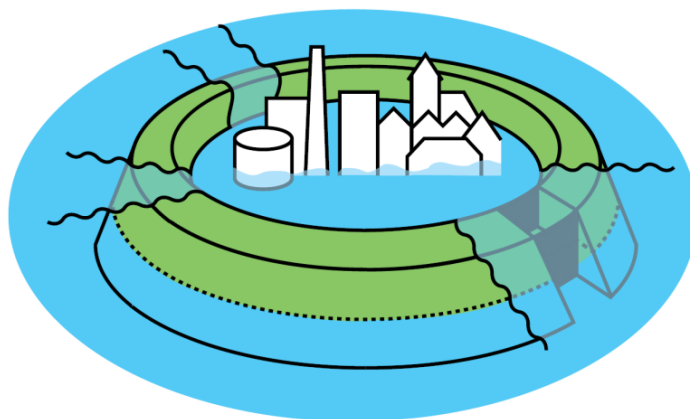
Bij de overstromingskansbenadering wordt gekeken wat de kans op overstroming is van een gebied dat door een stelsel van regionale waterkeringen wordt omringd. Een overstroming ontstaat als in dit stelsel ten minste één regionale waterkering faalt. Dit vraagt om het stelsel van regionale waterkeringen in samenhang te beschouwen en om er rekening mee te houden dat de faalkans van een waterkering toeneemt naarmate deze langer is. Van falen is sprake als optredende aantastingen en vervormingen zodanig omvangrijk zijn geworden dat een regionale waterkering niet meer in staat is om zijn primaire functie (het keren van het water van het regionale watersysteem) te vervullen; zie Figuur 17.



Figuur 17: Falen van een waterkering

4.3 Vereist beschermingsniveau

Zoals gezegd, wordt bij de overstromingskansbenadering het stelsel van regionale waterkeringen in samenhang beschouwd: de bescherming van het gebied staat centraal; zie Figuur 18.



Figuur 18: Overstromingskansbenadering richt zich op het gehele stelsel van waterkeringen rondom een gebied (Veiligheid Nederland in Kaart, 2011)

Falen van een regionale waterkering treedt op als de belasting groter is dan de sterkte. De veiligheidsnorm bij de overstromingskansbenadering drukt uit wat een toelaatbare kans is dat de belasting groter is dan de sterkte. En omdat de bescherming van het gebied centraal staat, heeft de veiligheidsnorm betrekking op de lengte van alle regionale waterkeringen rond het gebied of, als alternatief, op de afzonderlijke lengten van ringdelen waarin de regionale waterkeringen kunnen worden onderverdeeld als wordt gekeken naar de gevolgen van een overstroming.

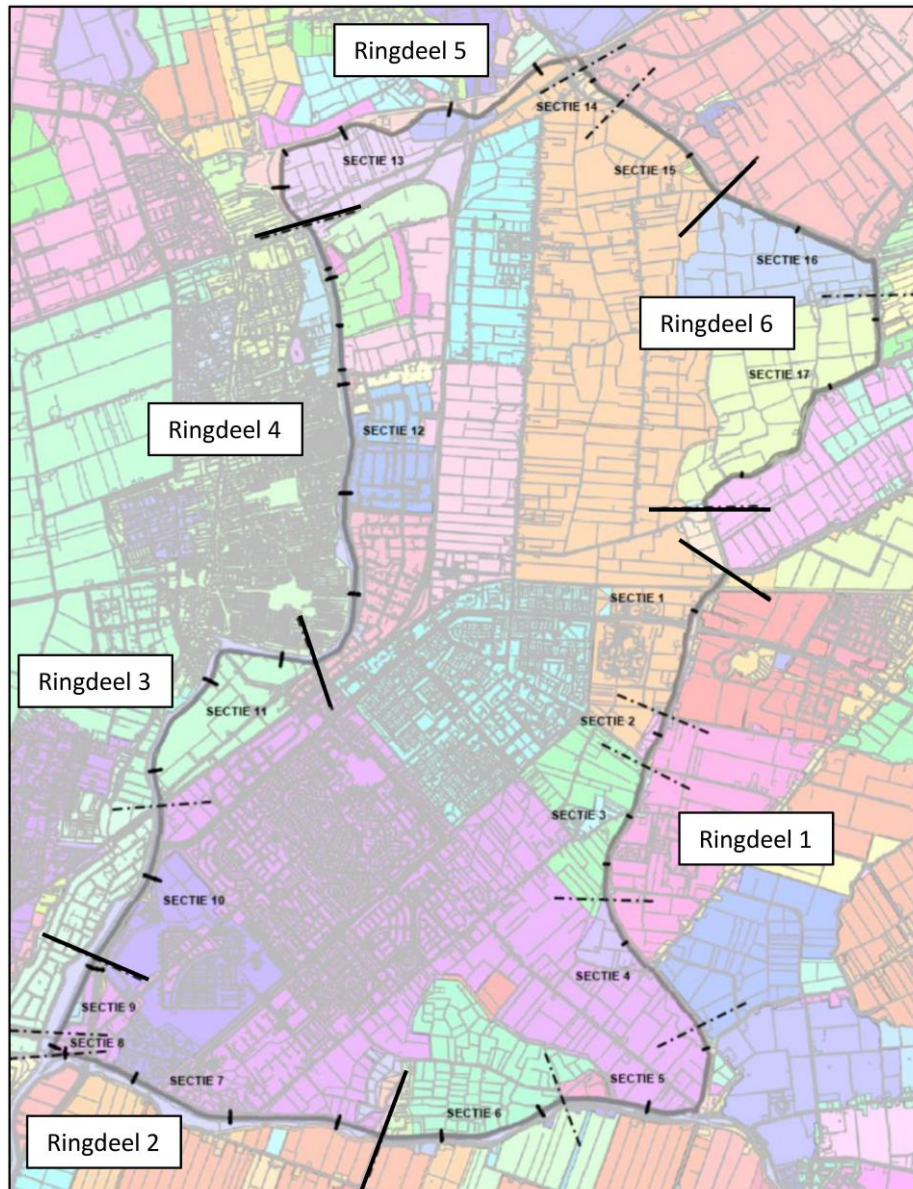
Voor de boezemstelsels van Hollands Noorderkwartier zijn in 2011 analyses gemaakt van het verloop van de overstroming bij doorbraak van een boezemkade. Dat is gebeurd met behulp van het modelinstrumentarium SOBEM (2D-berekeningen). De gevolgen van een overstroming zijn destijds berekend met methode HIS SSM. De resultaten van de gemaakte analyses zijn beschikbaar via het informatiesysteem Lizard Flooding. Figuur 19 geeft een overzicht van de doorbraaklocaties, waarvoor de analyses zijn uitgevoerd in de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard.



Figuur19: Beschikbare doorbraaklocaties in regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard (<https://flooding.lizard.net/>)

Verdere toelichting over overstromingsinformatie is opgenomen in Bijlage 3.

De bij toetsing op veiligheid onderscheiden dijksecties (Figuur 14) zijn geclusterd tot ringdelen, vergelijkbaar met de normtrajecten die bij primaire waterkeringen zijn onderscheiden. Binnen ieder ringdeel zijn het overstromingspatroon en de gevolgen van een overstroming van de verschillende doorbraaklocaties vergelijkbaar. Figuur 20 toont de indeling in ringdelen die bij een eerdere analyse van het overstromingsrisico van polder Heerhugowaard is opgesteld (Lendering et al., 2015a, 2015b; Lendering, 2018). Deze indeling is in het voorliggende rapport overgenomen.



Figuur 20: Ringdelen regionale waterkering rond polder Heerhugowaard (vrij naar Lendering et al., 2015a, 2015b; Lendering, 2018)

Bij de normering van de primaire waterkeringen is naar drie risicomaten gekeken:

- Het individueel risico: de kans dat een persoon overlijdt door overstroming (rekening houdend met de mogelijkheid van evacuatie);
- Het economisch risico: de jaarlijkse verwachtingswaarde van de schade door overstroming (product van kans en schade);
- Het groepsrisico: de kans dat een grote groep mensen overlijdt door overstroming.

Bij de primaire waterkeringen zijn de normen afgeleid op basis van twee principes:

1. Iedereen achter dijken en duinen krijgt een basisbeschermingsniveau (individueel risico)
2. Meer bescherming wordt geboden op plaatsen waar sprake kan zijn van maatschappelijke ontwrichting:
 - a. grote economische schade (economische risico), en/of
 - b. grote groepen slachtoffers (groepsrisico).

Bij het afleiden van het vereiste beschermingsniveau voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard zijn de bovenstaande drie risicomaten ook in beschouwing genomen. Bijlage 4 bevat de uitwerking voor het individueel risico. Bijlage 5 en Bijlage 6 hebben betrekking op de uitwerking voor het economisch risico. En Bijlage 7 gaat over de uitwerking voor het groepsrisico.

In Bijlage 8 zijn de drie risicomaten in samenhang beschouwd. Het economisch risico blijkt voor alle ringdelen rond polder Heerhugowaard maatgevend te zijn, ook als de mogelijkheid van evacuatie buiten beschouwing wordt gelaten. Tabel 3 bevat de vereiste faalkansen.

Ringdeel	Vereiste faalkans [1/jaar]
1	1/7.846
2	1/37.306
3	1/8.490
4	1/9.137
5	1/1.652
6	1/382

Tabel 3: Vereiste faalkans per ringdeel op grond van drie risicomaten voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard

Merk op dat Tabel 3 voor ieder ringdeel de vereiste faalkans weergeeft voor de totale lengte van dat ringdeel. Dit betekent dat de getalswaarde voor de vereiste faalkans steeds moeten worden beschouwd in relatie tot de lengte van het beschouwde ringdeel. Ook voor de primaire waterkeringen geldt deze relatie. Om de getalswaarden van de vereiste faalkansen voor de regionale waterkeringen direct te kunnen vergelijken met de normering voor de primaire waterkeringen van Hollands Noorderkwartier is het nodig om de vereiste faalkans van een specifiek faalmechanisme op doorsnede-niveau te bepalen.

Net als bij de normering van de primaire waterkeringen, is voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard gewerkt met normklassen. En ook is weer onderscheid gemaakt tussen de signaleringswaarde (de 'afkeurgrens') en de ondergrens (het 'minimaal vereiste beschermingsniveau'). Voor de achtergrond wordt verwezen naar Bijlage 9. Na bewerking van de waarden zoals vermeld in Tabel 3, resulteren de waarden zoals weergegeven in Tabel 4.

Ringdeel	Signaleringswaarde vereiste faalkans [1/jaar]	Ondergrens vereiste faalkans [1/jaar]
1	1/10.000	1/3.000
2	1/30.000	1/10.000
3	1/10.000	1/3.000
4	1/10.000	1/3.000
5	1/1.000	1/300
6	1/300	1/100

Tabel 4: Signaleringswaarde en ondergrens vereiste faalkans per ringdeel voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard

4.4. Toetsen op veiligheid

In aansluiting op de bij de overschrijdingsbenadering verkregen toetsresultaten (paragraaf 3.4), wordt bij de verdere uitwerking gefocust op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts.

Bij het toetsen op veiligheid is de eerste stap om de topeisen, zoals vermeld in Tabel 4, te vertalen naar eisen per te beschouwen faalmechanismen. Er is een zekere vrijheid voor de wijze waarop hieraan invulling wordt gegeven. Vooralsnog is voor het toetsen van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard gekozen om aan te sluiten bij de in Figuur 11 vermelde faalkansverdeling zoals afgeleid voor de overschrijdingskansbenadering. Dat betekent dat de **vereiste faalkans** voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts 80% bedraagt van de in Tabel 4 vermelde faalkansen. Het resultaat is opgenomen in Tabel 5.

Ringdeel	Signaleringswaarde vereiste faalkans macrostabiliteit binnenwaarts [1/jaar]	Ondergrens vereiste faalkans macrostabiliteit binnenwaarts [1/jaar]
1	1/12.500	1/3.750
2	1/37.500	1/12.500
3	1/12.500	1/3.750
4	1/12.500	1/3.750
5	1/1.250	1/375
6	1/375	1/125

Tabel 5: Signaleringswaarden en ondergrenzen vereiste faalkans per ringdeel voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Zoals toegelicht in paragraaf 3.3, is in 1999, bij de introductie van de toetsnormen voor regionale waterkeringen, op beleidsmatige gronden gekozen om het vereiste beschermingsniveau niet te baseren op een beschouwing van risicomaten maar op het principe van 'geen trendbreuk'. Op basis van Figuur 11 kan het toen gekozen beschermingsniveau ook worden omgezet in een vereiste faalkans voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. De uitwerking hiervan is opgenomen in Bijlage 11. Het resultaat is opgenomen in Tabel 6.

Ringdeel	Vereiste faalkans macrostabiliteit binnenwaarts op grond van overschrijdingskansnormering [1/jaar]
1	1/532
2	1/912
3	1/1.342
4	1/1.596
5	1/930
6	1/12

Tabel 6: Vereiste faalkans per ringdeel op grond van overschrijdingskansnormering voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Tabel 6 laat zien dat er, door het lengte-effect, op ringdeelniveau verschillende vereiste faalkansen resulteren. Dit ondanks dat de overschrijdingskansnorm, zoals gezien in paragraaf 3.3, Figuur 13, voor bijna alle dijksecties gelijk is.

Vergelijking van Tabel 6 met de ondergrens uit Tabel 5 laat zien dat een economische beschouwing rechtvaardigt om het beschermingsniveau (faalkans) van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard een factor 1 tot 14 strenger te maken. Dit is in lijn met de ervaring uit 1999 (zie paragraaf 3.3), waarbij uit geanalyseerde cases bleek dat het risico als gevolg van falen van een boezemkade gemiddeld circa 10 keer groter was dan het risico als gevolg van falen van een primaire waterkering.

De **aanwezige faalkans** per ringdeel, behorend bij de situatie die aanwezig was voorafgaand aan de in paragraaf 3.5 besproken kadeversterkingen, kunnen direct worden afgeleid van de resultaten van de toetsing op veiligheid op basis van de overschrijdingskansbenadering. De toelichting over de gevolgde werkwijze is opgenomen in Bijlage 12. Het resultaat van de omrekening is opgenomen in Tabel 7.

Ringdeel	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts [1/jaar]
1	1/23
2	1/6
3	1/6
4	< 1/1.000.000
5	1/2.086
6	1/2.283

Tabel 7: Aanwezige faalkans per ringdeel voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij semi-probabilistische rekenaanpak

De in Tabel 7 vermelde aanwezige faalkansen vloeien direct voort uit de semi-probabilistische rekenaanpak die ten grondslag ligt aan de toetsing op veiligheid op basis van de overschrijdingskansbenadering (zie ook Bijlage 1). Het is echter mogelijk om een niveau dieper te gaan en een probabilistische rekenaanpak te volgen.

Een probabilistische rekenaanpak vraagt om aanvullende analyses (niet om aanvullende gegevensinwinning), maar heeft als voordeel dat verfijning mogelijk is van enkele algemene uitgangspunten die bij de semi-probabilistische rekenaanpak worden gebruikt. Bij de probabilistische analyse op doorsnedeniveau die in 2015 is uitgevoerd voor polder Heerhugowaard, is rekening gehouden met onzekerheid over de boezemwaterstand tegen de regionale waterkeringen in relatie tot het afkondigen van een maalstop, onzekerheid over de grootte van de verkeersbelasting op de regionale waterkeringen en onzekerheid over de ligging van de freatische lijn in de regionale waterkeringen (Lendering et al., 2015a). Voor de ringdelen 1, 2 en 3 is het resultaat van de probabilistische rekenaanpak opgenomen in Tabel 8.

Ringdeel	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts [1/jaar]
1	1/303
2	1/1.429
3	1/39

Tabel 8: Aanwezige faalkans per ringdeel voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij probabilistische rekenaanpak (Lendering et al., 2015a, 2015b)

Vergelijking van Tabel 8 met Tabel 7 laat zien dat een geavanceerdere rekenaanpak ertoe leidt dat de aanwezige faalkans een factor 6 tot 238 gunstiger wordt.

Ook biedt een probabilistische rekenaanpak de mogelijkheid om aanwezige faalkansen aan te scherpen met de methode van bewezen sterkte. Zoals toegelicht in paragraaf 2.4 en met name geïllustreerd met Tabel 1, bedraagt het verschil tussen de dagelijkse (streefpeil) en extreme (maalstop) waterstanden slechts enkele decimeters. Voor de toepassing van de methode van bewezen sterkte is de beschikbaarheid vereist van nauwkeurige en betrouwbare gegevens van succesvol gekeerde belastingen uit het verleden. Voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard zijn eerder enkele analyses uitgevoerd voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts (Lendering, 2019). Tabel 9 bevat het resultaat van deze analyses.

Ringdeel	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts [1/jaar]
1	1/2.250
3	1/1.100

Tabel 9: Aanwezige faalkans per ringdeel voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij probabilistische rekenaanpak in combinatie met bewezen sterkte (Lendering, 2019)

Vergelijking van Tabel 9 met Tabel 7 laat zien dat een geavanceerdere rekenaanpak in combinatie met bewezen sterkte ertoe leidt dat de aanwezige faalkans een factor 98 tot 183 gunstiger wordt.

Resultierend zijn de aanwezige overstromingskansen gevonden zoals weergegeven in Tabel 10.

Ringdeel	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch [1/jaar]	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts probabilistisch [1/jaar]	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts probabilistisch in combinatie met bewezen sterkte [1/jaar]	Resulterende aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts [1/jaar]
1	1/23	1/303	1/2.250	1/2.250
2	1/6	1/1.429		1/1.429
3	1/6	1/39	1/1.100	1/1.100
4	< 1/10.000.0000			< 1/10.000.0000
5	1/2.086			1/2.086
6	1/2.283			1/2.283

Tabel 10: Aanwezige faalkans per ringdeel voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts op basis van diverse rekenaanpakken

Voor de regionale waterkering rond polder Heerhugowaard is voor het toekennen van categorieën van toetsoordelen aangesloten bij de werkwijze voor primaire waterkeringen. De uitwerking hiervan is te vinden in Bijlage 13. De resulterende toetsoordelen zijn opgenomen in Tabel 11.

Ringdeel	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts	Omschrijving
1	V_t	Voldoet niet aan de ondergrens
2	V_t	Voldoet niet aan de ondergrens
3	V_t	Voldoet niet aan de ondergrens
4	I_t	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde
5	II_t	Voldoet aan de signaleringswaarde
6	II_t	Voldoet aan de signaleringswaarde

Tabel 11: Toetsoordeel per ringdeel voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Door vergelijking van Tabel 11 met Figuur 15 blijkt dat de veiligheidsopgave betrekking heeft op dezelfde dijkstrekkings. Dit ondanks dat het vereiste beschermingsniveau (faalkans) bij de overstromingskansbenadering strenger is geworden ten opzichte van het vereiste beschermingsniveau (faalkans) bij de overschrijdingskansbenadering.

Een voordeel van de overstromingskansbenadering is dat de toetsoordelen veel meer nuanciering bevatten dan het toetsoordeel 'voldoet' of 'voldoet niet' waarin de uitkomst bij de overschrijdingskansbenadering wordt uitgedrukt. Dat kan behulpzaam zijn bij het kiezen, prioriteren en programmeren van de benodigde maatregelen.

De regionale waterkeringen die onderdeel uitmaken van de ringdelen 4, 5 en 6 voldoen aan de signaleringswaarde en dus ook aan de ondergrens. De beheerinspanning voor de betreffende regionale waterkeringen kan zich richten op het in stand houden van het aanwezige beschermingsniveau. Het verdient aanbeveling om te verkennen welke onderhoudsstrategie daarbij het meest doelmatig is.

Voor de regionale waterkeringen die onderdeel uitmaken van de ringdelen 1, 2 en 3 is uit de toetsing op veiligheid gebleken dat maatregelen vereist zijn. Deze komen aan de orde in paragraaf 4.5.

4.5 Maatregelen

In deze paragraaf worden verschillende typen maatregelen beschouwd om de veiligheidssituatie van de ringdelen 1, 2 en 3 te verbeteren. In paragraaf 4.5.1 wordt gekeken naar kadeverbetering. Paragraaf 4.5.2 beschouwt naar het effect van beperken van de verkeersbelasting. In paragraaf 4.5.3 wordt in beeld gebracht of een betere beheersing van de boezenwaterstand een gunstig effect heeft. En paragraaf 4.5.4 sluit af met een verkenning van het effect van boezemcompartimentering.

4.5.1 Kadeverbetering

Zoals toegelicht in paragraaf 3.5, zijn voor dijksectie 4, 5 en 6 (ringdeel 1), voor dijksectie 8 en 9a (ringdeel 2) en voor dijksectie 11 (ringdeel 3) kadeverbeteringen uitgevoerd. Voor dijksectie 7 (ringdeel 2) is de planvorming al gereed maar is de kadeverbetering (medio 2020) nog niet uitgevoerd. Al deze kadeverbeteringen waren gericht op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts.

In Bijlage 14 wordt toegelicht hoe voor ringdeel 1 en 2 met een semi-probabilistische rekenaanpak (binnen de overstromingskansbenadering) het effect van kadeverbetering kan worden gekwantificeerd in termen van een faalkans. Hierbij kan een met een eenvoudige aanpak al resultaat worden bereikt en is een probabilistische analyse nog niet aan de orde. Uit de gevolgde analyse blijkt dat de faalkans door de kadeverbetering is verbeterd met een factor 98 (ringdeel 1) tot 446 (ringdeel 2).

Met de kadeverbetering wordt op basis van bovenstaande kwantificering voldaan aan de faalkans die is vereist om te voldoen aan het beschermingsniveau dat hoort bij de vigerende overschrijdingskansbenadering. Maar op grond van uitsluitend deze semi-probabilistische rekenaanpak kan niet direct worden geconcludeerd dat met de kadeverbetering ook wordt voldaan aan de signaleringswaarde voor de faalkans die is vereist bij een overstromingskansbenadering.

In Tabel 10 zijn voor ringdeel 1 en 2 de (resulterende) aanwezige faalkansen vermeld voor de bestaande situatie. Deze behoren bij een probabilistische aanpak. Op deze aanwezige faalkansen zijn de gevonden verbeterfactoren toegepast, die met de semi-probabilistische rekenaanpak zijn gevonden. Op deze wijze is de aanwezige faalkans na kadeverbetering afgeleid. Na een hertoetsing van de verbeterde kade resulteren dan voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts de toetsoordelen zoals weergegeven in Tabel 12.

Ringdeel	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts na verbeteren
1	II_t
2	II_t

Tabel 12: Toetsoordelen ringdeel 1 en 2 na kadeverbetering voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Uit Tabel B12 blijkt, dat de ringdelen 1 en 2 na de kadeverbetering voldoen aan de signaleringswaarde en dus ook aan de ondergrens.

4.5.2 Verkeersmaatregelen

In Bijlage 15 is verkend of het mogelijk is om de veiligheidsopgave te verkleinen door het nemen van een beheermaatregel: het onder maatgevende omstandigheden weren van verkeer op de regionale waterkering. Dit heeft invulling gekregen voor ringdeel 2, omdat in 2015 is bij probabilistische analyses (Lendering et al., 2015a) van dit ringdeel is gebleken dat de aanwezige faalkans voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts zeer gevoelig is voor het wel of niet aanwezig zijn van verkeersbelasting. Door het nemen van verkeersmaatregelen kan verkeer onder maatgevende omstandigheden van de regionale waterkering worden geweerd. Maar het is niet vanzelfsprekend dat verkeersmaatregelen succesvol zijn; de kans op falen van deze maatregelen moet daarom in de beschouwing worden betrokken. Wanneer daarna een hertoetsing wordt uitgevoerd voor verkeersmaatregelen als beheermaatregel, dan resulteren de in Tabel 13 vermelde toetsoordelen.

Faalkans verkeersmaatregelen	Toetsoordeel ringdeel 2 macrostabiliteit binnenwaarts bij verkeersmaatregelen
[-]	
1/2	V_t
1/4	V_t
1/10	III_t
1/50	II_t

Tabel 13: Toetsoordelen ringdeel 2 voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, in relatie tot faalkans verkeersmaatregelen

Tabel 13 laat, door vergelijking met Tabel 11, zien dat het nemen van verkeersmaatregelen kan leiden tot een beperking van de veiligheidsopgave of zelfs tot het verdwijnen hiervan.

Vanwege het positieve effect, wordt een vervolganalyse zinvol geacht. Na inventarisatie van de aan verkeersmaatregelen verbonden kosten en baten, kan een vergelijking worden gemaakt met de kosten en baten van kadeverbetering en kan onderbouwd worden gekozen voor de maatregel die het meest doelmatig (kosteneffectief) is.

4.5.3 Extra gemaalcapaciteit

Sinds 2017 zijn er veranderingen in de Schermerboezem aangebracht. Onder andere voor wat betreft de aanwezige gemaalcapaciteit: bouw van een extra gemaal bij Schardam (2017) en bij Monnickendam (gereed eind 2022). Vergeleken met de situatie van vóór 2017 zal de gemaalcapaciteit van de Schermerboezem eind 2022 met meer dan 50% zijn toegenomen. In Bijlage 16 is verkend of de resulterende verbetering van de peilbeheersing van de Schermerboezem kan worden vertaald in een beperking van de veiligheidsopgave van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Dit heeft invulling gekregen voor ringdeel 2 en 3.

Door Hollands Noorderkwartier zijn met het waterbewegingsmodel SOBEK voor de gehele Schermerboezem berekeningen gemaakt van de na extreme neerslag te verwachten boezemwaterstand op locaties met een tussenafstand van ongeveer 1 km.

In het kader van de gebiedspilot zijn de berekeningsresultaten voor ringdeel 2 en 3 geanalyseerd. Daaruit kwam naar voren dat de bandbreedte voor de maatgevende boezemwaterstand globaal ligt tussen NAP - 0,3 m (alle boezemgemalen op maximale capaciteit en wind uit gunstige richting) en NAP + 0,0 m (maalstoppeil, vanwege uitval van alle boezemgemalen en wind uit ongunstige richting).

Een verlaging van de maatgevende boezemwaterstand naar ongeveer NAP - 0,2 m wordt haalbaar geacht, maar om dit te kunnen kwantificeren is inzicht nodig in de kans op uitval van boezemgemalen, de kans op niet-sluiten van het front om de Schermerboezem te compartimenteren en de kans op wind uit een bepaalde richting. Die informatie was in het kader van de gebiedspilot echter niet beschikbaar.

Bij de toetsing op veiligheid met als maatgevende boezemwaterstand het maalstoppeil (NAP + 0,00 m), hebben meerdere dijksecties binnen de ringdelen 2 en 3 de score 'onvoldoende' gekregen. Bij het streefpeil (NAP - 0,50 m) staan deze regionale waterkeringen permanent het streefpeil te keren en is er geen sprake van een veiligheidsprobleem. Dit illustreert dat een verlaging van de maatgevende boezemwaterstand naar NAP - 0,2 m potentie heeft om een grote verlaging van de veiligheidsopgave op te leveren.

Vanwege het verwachte positieve effect, wordt een vervolganalyse zinvol geacht.

4.5.4 Boezemcompartimentering

In Bijlage 17 is verkend of inzet op de (reeds aanwezige) mogelijkheid van compartimentering van de Schermerboezem onderbouwing levert voor een versoepeling van het vereiste beschermingsniveau en op die manier leidt tot een beperking van de veiligheidsopgave. Dit heeft invulling gekregen voor ringdeel 2 en 3. Daarbij is de analyse beperkt tot het economisch risico omdat dit maatgevend is gebleken.

Naarmate een boezemcompartiment kleiner is, zullen de gevolgen van een overstroming beperkter zijn. De centrale vraag bij de verkenning was dan ook: "Als een dijksectie binnen ringdeel 2 of 3 faalt, vanuit welk boezemcompartiment vindt er dan een overstroming plaats?". Uit de analyse bleek dat deze vraag alleen kan worden beantwoord in termen van kansen. Door te rekenen met de kans op niet-sluiten van de verschillende boezemcompartimenteringswerken kunnen namelijk scenariokansen worden afgeleid voor een overstroming vanuit de verschillende boezemcompartimenten die op dat moment aanwezig kunnen zijn.

De kans op niet-sluiten van de verschillende boezemcompartimenteringswerken was niet beschikbaar. In het kader van de gebiedspilot is hiervoor een set basiswaarden afgeleid. Die set is aangevuld met een gevoeligheidsanalyse. Vanwege het niet beschikbaar zijn van overstromingsanalyse vanuit boezemcompartimenten, is verder de schade na overstroming vanuit een boezemcompartiment op een indirecte wijze afgeleid. Vervolgens is de vereiste faalkans bepaald vanwege economisch risico. Daarna is de toetsing op veiligheid uitgevoerd en zijn de toetsoordelen bepaald zoals opgenomen in Tabel 14.

Ringdeel	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts met boezemcompartimentering bij basiswaarden kans op niet sluiten	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts met boezemcompartimentering bij 5 maal betere waarden kans op niet sluiten	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts met boezemcompartimentering bij 5 maal slechtere waarden kans op niet sluiten
2	III _t	III _t	V _t
3	III _t	II _t	IV _t

Tabel 14 Toetsoordelen ringdeel 2 en 3 voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, bij varianten inzet boezemcompartimentering

Tabel 14 laat, door vergelijking met Tabel 11, zien dat het in rekening brengen van boezemcompartimentering leidt tot een beperking van de veiligheidsopgave of zelfs tot het verdwijnen hiervan.

Vanwege het positieve effect, wordt een vervolganalyse zinvol geacht. De eerste stap hierbij is om een faalkansanalyse uit te voeren om te komen tot beter onderbouwde waarden van de aanwezige kans op niet-sluiten van ieder boezemcompartimenteringswerk. Mocht dat nodig zijn, dan is de vervolgstap om te kijken welke maatregelen nodig zijn om de kans op niet-sluiten te verbeteren. De kosten daarvan horen uiteraard in de analyse te worden betrokken. Door het uitvoeren van analyses van overstroming vanuit compartimenten, kunnen de baten van het in rekening brengen van boezemcompartimentering beter worden onderbouwd. Vervolgens kan een vergelijking worden gemaakt met de kosten en baten van kadverbetering en kan onderbouwd worden gekozen voor de maatregel die het meest doelmatig (kosteneffectief) is.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De overschrijdingskansbenadering is de vigerende veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen. De overstromingskansbenadering is de vigerende veiligheidsbenadering voor primaire waterkeringen. Het voorliggende rapport doet verslag van de gebiedspilot die is uitgevoerd voor de polder Heerhugowaard.

Het doel van deze gebiedspilot was om:

- Inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van de overstromingskansbenadering op regionale waterkeringen;
- De karakteristieken van de overschrijdingskansbenadering en de overstromingskansbenadering naast elkaar te presenteren;
- De meerwaarde en aandachtspunten van de overstromingskansbenadering te benoemen.

Waar relevant, worden onderstaand de uitkomsten van de gebiedspilot in relatie tot bovenstaande doelen gepresenteerd aan de hand van een vijftal aspecten.

1. Veiligheidsbenadering

Karakteristieken

Bij de overschrijdingskansbenadering staat de standzekerheid van de waterkering centraal. De maatgevende waterstand moet op een relevante doorsnede binnen een bepaald dijkvak door de waterkering veilig worden gekeerd.

Bij de overstromingskansbenadering staat de kans op overstroming van een gebied centraal. Dit sluit aan bij de beleving die bewoners hebben over het doel van waterkeringen: het voorkomen van overstroming van hun leefomgeving.

Meerwaarde en aandachtspunten

Als voor regionale waterkeringen wordt gekozen voor de overstromingskansbenadering als veiligheidsbenadering, dan ontstaat er meer eenduidigheid in de veiligheidsbenaderingen die binnen het waterdomein worden gebruikt. Voor de primaire waterkeringen is de overstromingskansbenadering immers al de vigerende veiligheidsbenadering en ook de normering voor wateroverlast (NBW-normering vanwege extreme neerslag) is gebaseerd op overstromingskansen. Deze eenduidigheid in veiligheidsbenadering biedt voordelen. Zo is het dan bij het uitvoeren van stresstesten in het kader van klimaatbestendigheid, mogelijk om de verschillende bronnen van overstroming/wateroverlast met elkaar in verband te beschouwen. Dat maakt het eenvoudiger om in beeld te brengen of er maatregelen zijn die gunstig uitwerken op meerdere bronnen van overstroming/wateroverlast of om op zijn minst te voorkomen dat er wordt gekozen voor een maatregel die gunstig is in relatie tot de ene bron, maar nadelig in relatie tot de andere bron. Inzicht hierin is onder andere van belang voor de bescherming van kwetsbare objecten en vitale infrastructuur.

In het geval van boezemkaden vormt een maatstop op het boezemstelsel een sprekend voorbeeld van de interactie tussen de veiligheidsbenadering van de regionale waterkeringen en de veiligheidsbenadering voor het watersysteem (wateroverlast). Het afkondigen van een maatstop gebeurt immers mede om de kans op doorbraak van boezemkaden en daarmee de kans op overstroming van polders te beperken, maar het betekent ook dat polders hun water niet meer op de boezem mogen lozen, waardoor er binnen deze polders kans is op wateroverlast.

De interactie tussen primaire waterkeringen en regionale waterkeringen kan worden geïllustreerd voor de in hoofdstuk 1 genoemde technische functie 'droge keringen'. Voor het formuleren van veiligheidseisen aan een compartimenteringsdijk, die een functie moet vervullen na het falen van een primaire waterkering, heeft het meerwaarde als beide typen waterkeringen worden benaderd vanuit dezelfde veiligheidsbenadering.

Bij de hoogwatersituatie in Limburg van juli 2021 kwam de interactie tussen extreme neerslag, hoogwater op de regionale rivieren en hoogwater op de Maas volop tot uitdrukking. Dit illustreert het belang van een beschouwing op watersysteemniveau. Daar komt bij dat de schade in de overstromde gebieden, zoals Valkenburg, globaal tweemaal zo hoog was als de schade (omgerekend naar prijspeil 2021) bij de hoge Maasafvoeren van 1993 en 1995 (Task Force Fact Finding hoogwater 2021, 2021). Dit laat zien dat er aanleiding is om te streven naar afstemming van de veiligheidsbenaderingen.

Samenvattend, opent het afstemmen van veiligheidsbenaderingen de weg om op watersysteemniveau te komen tot onderbouwde keuzes voor maatregelen die het meest doelmatig (kosteneffectief) zijn. Zolang voor de regionale waterkeringen wordt vastgehouden aan de overschrijdingskansbenadering zijn er, veelal slecht onderbouwde, vertaalslagen nodig om de verschillende onderdelen van het watersysteem in samenhang te kunnen beschouwen.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het hanteren van de overstromingskansbenadering tevens de mogelijkheid opent om op een genuanceerde wijze om te gaan met de aanwezigheid van niet-waterkerende objecten. Dit kan door gebruik te maken van het WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen (Schweckendiek, 2018). Dit veiligheidsraamwerk is al meerdere malen succesvol toegepast (Schelfhout et al., 2020).

2. Vereist beschermingsniveau

Toepasbaarheid

Uit de voorliggende rapportage blijkt, dat de overstromingskansbenadering toepasbaar en praktisch uitvoerbaar is voor regionale waterkeringen.

Bredere toepassing van de overstromingskansbenadering vraagt om een (in principe) eenmalige inspanning om het vereiste beschermingsniveau af te leiden, inclusief de optimale verhouding tussen signaleringswaarde en ondergrens.

Karakteristieken

Bij de overschrijdingskansbenadering is de veiligheidsnorm uitsluitend gerelateerd aan de hydraulische belasting ('de maatgevende waterstand'). Als vereist beschermingsniveau zijn zogenaamde toetsnormen vastgelegd. Deze toetsnormen zijn uitgedrukt in vijf veiligheidsklassen. Een veiligheidsklasse is hierbij gekoppeld aan de grootte van de directe economische gevolgschade door overstroming. Ook andere (bestuurlijke) overwegingen spelen in de praktijk een rol bij de normering.

Binnen de overstromingskansbenadering wordt het vereiste beschermingsniveau afgeleid door te kijken naar drie relevante risicomaten:

- Het individueel risico: de kans dat een persoon overlijdt door overstroming (rekening houdend met de mogelijkheid van evacuatie);
- Het economisch risico: de jaarlijkse verwachtingswaarde van de schade door overstroming (product van kans en schade);
- Het groepsrisico: de kans dat een grote groep mensen overlijdt door overstroming.

Meerwaarde en aandachtspunten

Bij de vigerende overschrijdingskansbenadering is het vereiste beschermingsniveau gekalibreerd (principe van 'geen trendbreuk') op de eisen uit het systematisch kade-onderzoek (TAW) uit de periode 1969 tot en met 1992. Om recht te doen aan het gegeven dat het landgebruik van polder tot polder sterk kan verschillen, is binnen de normering differentiatie aangebracht door onderscheid te maken in de grootte van de directe economische gevolgschade door overstroming. Hieruit blijkt dat de kosten van kadeverbetering geen onderscheidend aspect vormen binnen de vigerende veiligheidsbenadering. Binnen de gehanteerde systematiek blijven ook slachtoffers buiten beschouwing. Bij de toepassing van de systematiek is op beleidsmatige gronden soms getracht om deze omissie weg te nemen, door te kiezen voor de hoogste veiligheidsklasse als er een vermoeden is dat slachtoffers niet zijn uit te sluiten. Deze normverzwaring lijkt soms weer door te schieten. Al met al is het twijfelachtig of het mogelijk is om binnen de vigerende veiligheidsbenadering te komen tot een passend vereist beschermingsniveau en vervolgens tot doelmatige (kosteneffectieve) maatregelen.

Het vereiste beschermingsniveau (faalkans) dat met de overstromingskansbenadering voor polder Heerhugowaard is afgeleid, blijkt een orde strenger te zijn dan het beschermingsniveau (faalkans) dat wordt gehanteerd in het kader van de overschrijdingskansbenadering.

3. Toetsen op veiligheid

Toepasbaarheid

Uit de voorliggende rapportage blijkt, dat de overstromingskansbenadering toepasbaar en praktisch uitvoerbaar is voor regionale waterkeringen.

Bredere toepassing van de overstromingskansbenadering vraagt om een (in principe) eenmalige bijstelling van het toetsinstrumentarium.

Karakteristieken

Binnen de vigerende overschrijdingskansbenadering wordt momenteel bij het toetsen op veiligheid gebruik gemaakt van een semi-probabilistische rekenaanpak ('gedetailleerde toetsing'). Daarbij worden onzekerheden over de sterkte-eigenschappen van grondlagen verwerkt door het hanteren van veilige schattingen en wordt de vereiste veiligheid verkregen door te werken met veiligheidsfactoren. Omdat deze veiligheidsfactoren landelijk toepasbaar moeten zijn, krijgen ze over het algemeen op een conservatieve wijze invulling. De enige stap die daarna nog resteert is het uitvoeren van een geavanceerde toetsing.

Bij toepassing van de overstromingskansbenadering, kan de toetsing op veiligheid op verschillende niveaus van diepgang worden uitgevoerd:

- *Semi-probabilistisch:*
Ook bij de overstromingskansbenadering kan worden gekozen voor een semi-probabilistische rekenaanpak: de informatie die is verzameld in het kader van de vigerende overschrijdingskansbenadering kan één op één worden gehanteerd voor het bepalen van aanwezige faalkansen. De daarvoor benodigde berekening is niet wezenlijk anders dan de berekeningen die in het kader van de vigerende overschrijdingskansbenadering worden gemaakt.
- *Probabilistisch:*
Bij een probabilistische rekenaanpak (op doorsnedeniveau) worden onzekerheden over enkele dominante belastingen (zoals de hoogte van de boezemwaterstand onder extreme omstandigheden of de ligging van de freatische lijn in een boezemkade) expliciet beschouwd en gewogen. Hierdoor is in vergelijking met de semi-probabilistische rekenaanpak maatwerk mogelijk. De probabilistische rekenaanpak vraagt daarmee om het beschouwen van extra

belastingssituaties en aanvullende berekeningen. Hiervoor is bijvoorbeeld kennis nodig over het gedrag van het watersysteem, die veelal reeds is verzameld voor het boezembeheer. De benodigde extra inspanning voor de aanvullende berekeningen blijft beperkt, omdat het gaat om variaties op de basisschematisering. Extra veldonderzoek wordt niet voorzien, zolang wordt vastgehouden aan het bestaande gedragsmodel voor grond.

Ook biedt een probabilistische rekenaanpak de mogelijkheid om aanwezige faalkansen aan te scherpen met de methode van bewezen sterkte. Daarbij wordt gekeken naar succesvol gekeerde belastingen uit het verleden.

Meerwaarde en aandachtspunten

Een overstap van de overschrijdingskansbenadering naar de overstromingskansbenadering betekent niet automatisch ook een keuze voor een ander gedragsmodel voor grond. Ook binnen de overstromingskansbenadering is het mogelijk om de analyse uit te voeren op basis van gedraineerde sterkte-eigenschappen behorend bij het model van Mohr-Coulomb, zoals dat ook binnen de vigerende overschrijdingskansbenadering wordt gehanteerd. Daarmee impliceert een overstap naar de overstromingskansbenadering niet dat er een nieuwe en uitgebreide ronde gegevensverzameling nodig is. De overstap naar een ander gedragsmodel voor grond vormt een zelfstandige beleidskeuze.

Bij gebruik van de overstromingskansbenadering levert de toetsing op veiligheid bij polder Heerhugowaard een veiligheidsopgave op die betrekking heeft op dezelfde dijkstrekkingen als bij gebruik van de overschrijdingskansbenadering. Dit ondanks dat bij de overstromingskansbenadering is getoetst aan een vereist beschermingsniveau dat een orde strenger is.

De methode van bewezen sterkte heeft voor boezemkaden veel potentie, omdat het verschil tussen de dagelijkse en extreme waterstanden slechts enkele decimeters bedraagt. De methode van bewezen sterkte is eerder toegepast op enkele strekkingen van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard en leidde ertoe dat de aanwezige faalkans bijna een factor 100 of meer gunstiger werd.

4. Maatregelen

Toepasbaarheid

Uit de voorliggende rapportage blijkt, dat de overstromingskansbenadering toepasbaar en praktisch uitvoerbaar is voor regionale waterkeringen.

Karakteristieken

Binnen de overschrijdingskansbenadering is het niet goed mogelijk om een breder pallet aan maatregelen op een zuivere wijze af te wegen, omdat de faalkans van essentiële elementen daarbij buiten beschouwing wordt gelaten of op zijn best op een grove wijze wordt ingeschat.

Binnen de overstromingskansbenadering is het mogelijk om een zuivere afweging te maken tussen kadeverbetering, beheermaatregelen (zoals beperken van verkeersbelasting) en maatregelen op systeemniveau (extra gemaalinzet, boezemcompartimentering).

Meerwaarde en aandachtspunten

De overstromingskansbenadering biedt de mogelijkheid om onderbouwd te kiezen voor de maatregel die het meest doelmatig (kosteneffectief) is. Om een bredere pallet aan maatregelen te kunnen toepassen is het wel noodzakelijk om te investeren in kennis over het gedrag van het watersysteem: kans op falen verkeersmaatregel, kans op gemaaluitval, kans op niet sluiten boezemcompartimenteringswerk, enzovoorts. Ook is een raming nodig van de kosten van de verschillende maatregelen.

Hoewel in deze rapportage niet beschouwd, kunnen ook maatregelen buiten het watersysteem binnen de overstromingskansbenadering op een zuivere wijze worden afgewogen. Hierbij kan worden gedacht aan maatregelen gericht op de ruimtelijke inrichting van het beschermde gebied ('laag 2 binnen meerlaagsveiligheid') en aan een verzwaarde inzet op crisisbeheersing ('laag 3 binnen meerlaagsveiligheid'). Er bestaan studies, zoals (Lendering, 2018), waarin ook dit soort maatregelen zijn afgewogen.

5. Beheerfase

Karakteristieken

Binnen de overschrijdingskansbenadering is het niet goed mogelijk om de beheerinspanning te prioriteren op basis van risico's.

Binnen de overstromingskansbenadering is het mogelijk om keuzes in de activiteiten in de beheerfase te baseren op een zuivere afweging.

Meerwaarde en aandachtspunten

In de beheerfase zijn met name de cyclus van inspectie en onderhoud en de cyclus van vergunningverlening en handhaving relevant.

Uit de toepassing van de overstromingskansbenadering is gebleken dat de beheerinspanning zich voor de noordelijke boezemkaden rond polder Heerhugowaard kan richten op het in stand houden van het aanwezige beschermingsniveau. Onder de overstromingskansbenadering kan risicogestuurd beheer en onderhoud invulling krijgen door het formuleren van eenduidige prestatie-eisen. Daardoor kan het in stand houden op een meer kosteneffectieve wijze invulling krijgen dan onder de vigerende overschrijdingskansbenadering.

Samenvattend

Uit de gebiedspilot Heerhugowaard is gebleken dat de overstromingskansbenadering toepasbaar en praktisch uitvoerbaar is. De karakteristieken van de overschrijdingskansbenadering en de overstromingskansbenadering zijn naast elkaar gepresenteerd. Verder is geconstateerd dat de overstromingskansbenadering meerwaarde oplevert:

- Bij de overstromingskansbenadering staat de kans op overstrooming van een gebied centraal. Dit sluit aan bij de beleving die bewoners hebben over het doel van waterkeringen: het voorkomen van overstrooming van hun leefomgeving;
- Het hanteren van de overstromingskansbenadering voor regionale waterkeringen opent de weg om op watersysteemniveau (primaire waterkeringen-regionale waterkeringen-boezemwatersysteem-polderwatersysteem) te komen tot onderbouwde keuzes voor maatregelen die het meest doelmatig (kosteneffectief) zijn;
- Het hanteren van een overstromingskansbenadering krijgt invulling middels het beschouwen van relevante risicomaten. Daarmee liggen zowel de verwachte schade, de kosten van maatregelen als de kans op slachtoffers ten grondslag aan de hoogte van het vereiste beschermingsniveau.
- De toepassing van de overstromingskansbenadering vraagt in principe om een eenmalige inspanning om het vereiste beschermingsniveau af te leiden;
- Het beschermingsniveau kan kosteneffectief worden bepaald, waardoor desinvestering wordt voorkomen. Het vereiste beschermingsniveau dat met de overstromingskansbenadering voor polder Heerhugowaard is afgeleid, blijkt een orde strenger te zijn dan het beschermingsniveau dat wordt gehanteerd in het kader van de overschrijdingskansbenadering;
- Een overstap van de overschrijdingskansbenadering naar de overstromingskansbenadering betekent niet automatisch ook een keuze voor een ander gedragsmodel voor grond. Daarmee

impliceert een overstap naar de overstromingskansbenadering niet dat er voor de toetsing op veiligheid een nieuwe en uitgebreide ronde gegevensverzameling nodig is;

- Bij toepassing van de overstromingskansbenadering, kan de toetsing op veiligheid op verschillende niveaus van diepgang worden uitgevoerd:
 - Bij de keuze voor een semi-probabilistische rekenaanpak kan de informatie die is verzameld in het kader van de vigerende overschrijdingskansbenadering één op één worden gehanteerd voor het bepalen van aanwezige faalkansen. De daarvoor benodigde berekening is niet wezenlijk anders dan de berekeningen die in het kader van de vigerende overschrijdingskansbenadering worden gemaakt;
 - Bij de keuze voor een probabilistische rekenaanpak (op doorsnedeniveau) is maatwerk mogelijk. Dit vraagt om het beschouwen van extra belastingsituaties en aanvullende berekeningen. Hiervoor is bijvoorbeeld kennis nodig over het gedrag van het watersysteem, die veelal reeds is verzameld voor het boezembeheer. De benodigde extra inspanning voor de aanvullende berekeningen blijft beperkt, omdat het gaat om variaties op de basisschematisering.
Ook biedt een probabilistische rekenaanpak de mogelijkheid om aanwezige faalkansen aan te scherpen met de methode van bewezen sterkte. De methode van bewezen sterkte is eerder toegepast op enkele strekkingen van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard en leidde ertoe dat de aanwezige faalkans bijna een factor 100 of meer gunstiger werd;
- Binnen de overstromingskansbenadering is het mogelijk om een zuivere afweging te maken tussen kadeverbetering, beheermaatregelen (zoals beperken van verkeersbelasting) en maatregelen op systeemniveau (extra gemaalinzet, boezemcompartimentering). Daardoor kan onderbouwd worden gekozen voor de maatregel die het meest doelmatig (kosteneffectief) is. Om uit bredere pallet aan maatregelen onderbouwd te kunnen kiezen voor de meest doelmatige toepassingen is het wel noodzakelijk om te investeren in kennis over het gedrag van het watersysteem: kans op falen verkeersmaatregel, kans op gemaaluitval, kans op niet sluiten boezemcompartimenteringswerk, enzovoorts;
- Onder de overstromingskansbenadering kan risicogestuurd beheer en onderhoud invulling krijgen door het formuleren van eenduidige prestatie-eisen. Daardoor kan het in stand houden op een meer kosteneffectieve wijze invulling krijgen dan onder de vigerende overschrijdingskansbenadering.

5.2 Aanbevelingen

De gebiedspilot Heerhugowaard geeft aanleiding tot enkele aanbevelingen voor vervolgonderzoek. Die worden gepresenteerd conform de in paragraaf 5.1 behandelde aspecten.

1. Vereist beschermingsniveau

- Bij de pilot Heerhugowaard kwam bij een vergelijking van de uitkomsten van overstromingsmodellen een grote bandbreedte naar voren. Het kunnen beschikken over overstromingssimulaties volgens de laatste stand der techniek is zeer relevant voor een juiste onderbouwing van het vereiste beschermingsniveau. Dit geldt zowel voor de overstromingskansbenadering als voor de overschrijdingskansbenadering;
- Bij de pilot Heerhugowaard kwam bij een vergelijking van de uitkomsten van schademethoden een grote bandbreedte naar voren. Het kunnen beschikken over een schademethode die is toegesneden op overstromingen vanuit het regionale watersysteem is zeer relevant voor een juiste onderbouwing van het vereiste beschermingsniveau. Dit geldt zowel voor de overstromingskansbenadering als voor de overschrijdingskansbenadering;

- In deze gebiedspilot is bij de toepassing van de overstromingskansbenadering op de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard ervoor gekozen om het vereiste beschermingsniveau te bepalen door een aantal uitgangspunten voor primaire waterkeringen één op één over te nemen:
 - LIR-eis van 10^{-5} per jaar bij het afleiden van de vereiste faalkans vanwege individueel risico;
 - Discontovoet van 5,5% per jaar bij het afleiden van de vereiste faalkans vanwege economisch risico;
 - Economische groei van 1,9% per jaar bij het afleiden van de vereiste faalkans vanwege economisch risico;
 - Beleidsfactor $\beta = 1$ bij het afleiden van de vereiste faalkans vanwege groepsrisico;
 - Risico-aversie index $k = 3$ bij het afleiden van de vereiste faalkans vanwege groepsrisico;
 - Besteltijd van 20 jaar bij het afleiden van de signaleringswaarde.

In een navolgende gebiedspilot is het zinvol om te verkennen of deze uitgangspunten voor regionale waterkeringen bijstelling behoeven;

- Het heeft meerwaarde om in een navolgende gebiedspilot systeemwerking in beeld te brengen. Polders vormen immers onderdeel van een veel groter boezemsysteem. Dat betekent dat een boezemkadebreuk zal leiden tot verlaging van de boezemwaterstand langs andere polders. Dat kan positief uitpakken ('ontlasting'), maar kan door het wegvallen van tegendruk ook leiden tot buitenwaartse afschuivingen en daarmee tot navolgende overstromingen in andere polders leiden. Systeemwerking is relevant voor zowel de overschrijdingskansbenadering als de overstromingskansbenadering. De overstromingskansbenadering biedt echter ruimte om een zuivere analyse uit te voeren.

2. Toetsen op veiligheid

- In deze gebiedspilot is bij de toepassing van de overstromingskansbenadering op de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard ervoor gekozen om bij de toetsing op veiligheid de faalkansverdeling die in de jaren negentig is afgeleid voor de vigerende overschrijdingskansbenadering één op één over te nemen. In een opvolgende gebiedspilot is het zinvol om te verkennen of dit uitgangspunt voor regionale waterkeringen bijstelling behoeft;
- In deze gebiedspilot is bij de toepassing van de overstromingskansbenadering op de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard ervoor gekozen om bij de toetsing op veiligheid de begrenzingen voor categorieën van toetsoordelen voor primaire waterkeringen één op één over te nemen. In een opvolgende gebiedspilot is het zinvol om te verkennen of dit uitgangspunt voor regionale waterkeringen bijstelling behoeft.

Literatuur

- Bijlsma, E. & Tenhage, N. (2011). *Grondonderzoek en toetsing boezemkaden Cluster IIIC: Heerhugowaard, Groet- en Braakpolder*. Arcadis.
- Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (1981). *Onderzoek naar de veiligheid van de boezemkade van de polder Heerhugowaard en de polder Veenhuizen*.
- Deltacommissie (1960). *Rapport Deltacommissie: Deel 3 Bijdragen Beschouwingen over stormvloed en getijbeweging*.
- Diermanse, F., Lam, K.S. & Knoeff, H. (2016). *Assemblageprotocol WBI2017: Nadere uitwerking van het beoogde assemblageprotocol voor het wettelijke beoordelingsinstrumentarium*. Deltares.
- Eijgenraam, C. (2008). *Toetsnorm voor waterveiligheid op basis van kosten-batenanalyse*. Centraal Planbureau.
- Eijgenraam, C. (2011). *Een algemeen toepasbare definitie voor de toetsnorm voor waterveiligheid: Aanvulling en correctie op CPB memorandum 195 (5/2008/2, 19 maart 2008)*. Centraal Planbureau.
- Hofman, P.J., Biemans, R. & De Vries, A. (2018, oktober). *Vergeeten boezemscheidingen: Gebouwd voor de oorlog, nu geschikt voor waterveiligheid*. H2O, 51(10), 23-25.
- Hoogendoorn, D. & Biemans, R. (2020). *Programmaplan ORK IV: Slim investeren en uitlegbaar veilig*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (2014). *Peilbesluit Schermerboezem en Vereenigde Raakmaats- en Nedorperkogge boezem, Wsb. 2014, 3962*.
- Jonkman, S.N. (2007). *Loss of life estimation in flood risk assessment: Theory and applications; Proefschrift*. Technische Universiteit Delft.
- Kind, J. (2011). *Maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21e eeuw: Hoofdrapport, Bijlage A en Bijlage B*. Deltares.
- Kok, M., Jongejan, R., Nieuwjaar M. & Tánčzos, I. (2017). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming (2de ed.)*. Expertise Netwerk Waterveiligheid.
- Komen, H. (2016, oktober). *Ontstaan en ontwikkeling van het meer de Waard, deel 1*. Poldergeest, (23), 3-6.
- Komen, H. (2017, mei). *Ontstaan en ontwikkeling van het meer de Waard, deel 2 (slot)*. Poldergeest, (24), 7-10.
- Kwakman, L. & Haanstra, J. (2015). *Veiligheidstoets Boezemkaden Heerhugowaard: Nader onderzoek en hertoetsing 2014, Technisch oordeel + Beheerdersoordeel*. Hollands Noorderkwartier.
- Lendering, K.T., Kok, M & Jonkman, S. N. (2015a). *Flood risk of regional flood defences*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

- Lendering, K.T., Kok, M & Jonkman, S. N. (2015b). *Overstromingsrisico regionale keringen*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Lendering, K.T. (2018). *Advancing methods for evaluating flood risk reduction measures; Dissertation*. Technische Universiteit Delft.
- Lendering, K.T. (2019, 30 september). *Ervaringen met de overstromingskansbenadering bij regionale keringen* [Powerpoint-slides]. Technische Universiteit Delft.
- Maaskant, B., Jonkman, S.N. & Kok, M. (2009). *Analyse slachtofferaantallen VNK-2 en voorstellen voor aanpassingen van slachtofferfuncties*. HKV lijn in Water.
- Nelen & Schuurmans (2016). *Gevoeligheidsanalyse IPO-classes: Vergelijking SOBEK 2D, 3Di, HIS-SSM en WSS*.
- Nelen & Schuurmans (2019). *WaterSchadeSchatter (WSS): Gebruikershandleiding*.
- Nieuwjaar, M.W.C. (2020). *De veiligheidsbenadering regionale keringen: Ontstaan, achtergronden en toepassing van de huidige veiligheidsbenadering voor regionale waterkeringen*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Projectbureau VNK2 (2011). *De methode van VNK2 nader verklaard: De technische achtergronden*.
- Provincie Noord-Holland (2009). *Waterverordening Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Prb. 2009, 162*.
- Provincie Noord-Holland (2013). *Waterverordening Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Bijlage 1B Kaart veiligheidsnormen regionale waterkeringen, Prb. 2013, 74*.
- Provincie Noord-Holland (2020). *Omgevingsverordening NH2020, Prb. 2020, 8426*.
- Provincie Utrecht, Provincie Noord-Holland, Provincie Zuid-Holland & Provincie Gelderland (2006). *Verordening waterkering West-Nederland*.
- Rijkswaterstaat (2018). *Gebruikershandleiding Schade Slachtoffer Module (SSM)*.
- Schelfhout, H., Nurmohamed, N., Janssen, J. & De Koning, M. (2020). *Veiligheidsraamwerk POV K&L: Toepassing in de praktijk*. Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen.
- Schweckendiek, T. (2018). *WBI Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen: Generieke uitgangspunten als vertrekpunt voor nadere uitwerking in (pilot) projecten*. Deltares.
- Siertsema, R.R. (2017, december). *De Waterwolf en de Russische Beer*. Tijdschrift voor Waterstaatsgeschiedenis, 26(2), 91-104.
- Slager, K. & Wagenaar, D. (2017). *Standaardmethode 2017: Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen*. Deltares.
- Slootjes, N. & Van der Most, H. (2016a). *Achtergronden bij de normering van de primaire waterkeringen in Nederland: Hoofdrapport*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

- Slootjes, N. & Van der Most, H. (Reds.) (2016b). *Technisch-inhoudelijke uitwerking van eisen aan primaire waterkeringen: Bijlagen*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (2015a). *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale waterkeringen: Module Introductie met Bijlagen, Bijlage 1 Raamwerk partiële veiligheidsfactoren regionale keringen*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (2015b). *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale waterkeringen: Module Introductie met Bijlagen, Bijlage 3 Restbreedte benadering stabiliteit binnenwaarts*.
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (2017). *Visie op regionale waterkeringen 2016: Verder bouwen op een goed fundament*.
- Task Force Fact Finding hoogwater 2021 (2021). *Hoogwater 2021: Feiten en Duiding (versie 2)*. Expertise Netwerk Waterveiligheid.
- Unie van Waterschappen (2004). *Visie op regionale waterkeringen*.
- Van den Herik, Y.R.J. (2015). *Kadeverbetering Heerhugowaard: Definitief Ontwerp*. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.
- Van der Giessen, K. (2014). *Geotechnische berekeningen en Ontwerp verbetering waterkering Broekhornpolder*. Grontmij.
- Van der Meer, M.T., Stoop, J.D. & Eerikens, J.W. (1999). *IPO-richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden*. Interprovinciaal Overleg.
- Van der Meer, M.T., Kapinga, H.S.O., Jonkman, L.N., Lam, K.S. & Calle, E.O.F. (2009). *Materiaalfactoren boezemkaden*. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Van der Veen, J, Horst, M. & Van Breugel, A. (2012). *Gemeente Heerhugowaard; een historisch-geografische inventarisatie (inclusief de karakteristieke bebouwing)*. Cultuurcompagnie Noord-Holland & Gemeente Heerhugowaard.
- Van Duinen, T.A., Van Deen, J.K. & De Bruijn, H. (2016). *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit WBI 2017*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Veiligheid Nederland in Kaart (2011). *VNK2: Overschrijdingskans, Overstromingskans, Overstromingsrisico*.
- Vrijling, J.K. (1985). *Enkele gedachten aangaande een aanvaardbaar risiconiveau in Nederland*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Werkgroep Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier (2004). *Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier: Deelrapporten, Deelrapport 5 Normeringsprocedure boezemkaden*.
- Wet van 2 november 2016 tot wijziging van de Waterwet en enkele andere wetten (nieuwe normering primaire waterkeringen), Stb. 2016, 431.*

Overzicht bijlagen

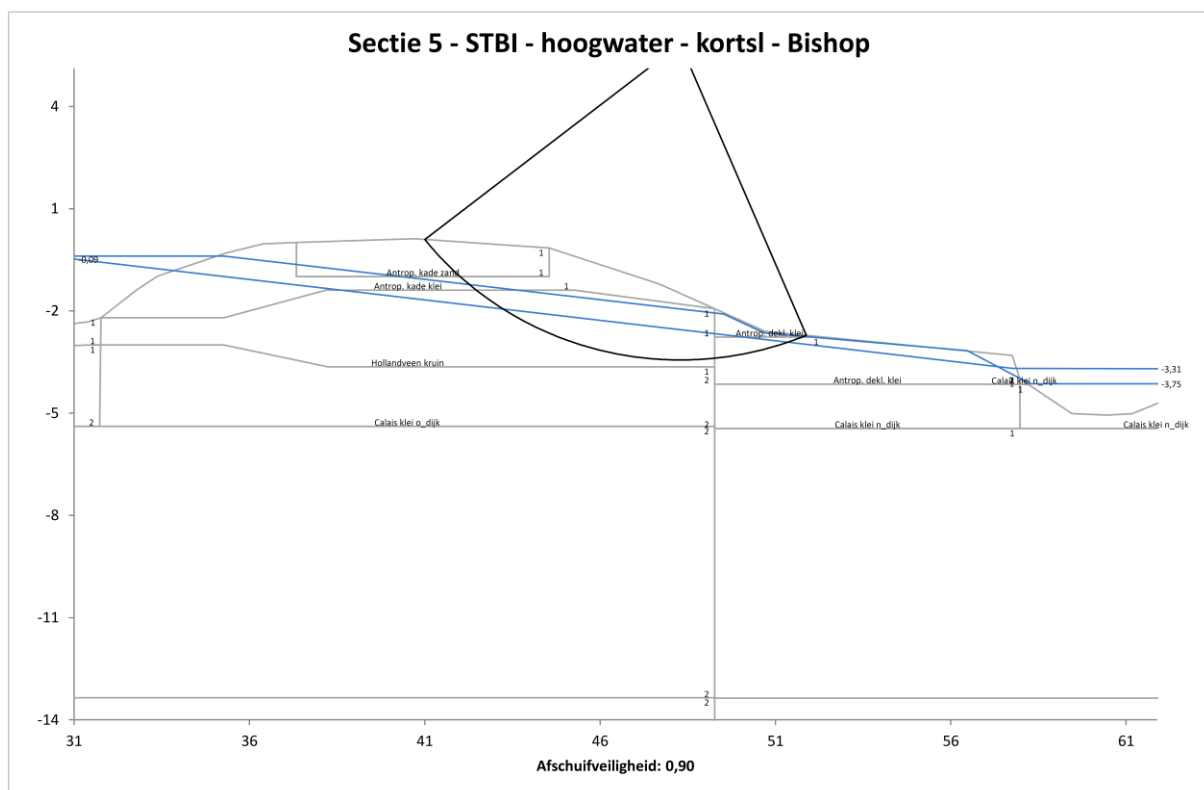
1. Overschrijdingskansbenadering: Toetsen op veiligheid voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts
2. Overschrijdingskansbenadering: Dimensioneren verbetermaatregelen voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts
3. Overstromingsinformatie
4. Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege individueel risico
5. Overstromingskansbenadering: Analytische afleiding economisch optimale faalkans bij kadeverbetering
6. Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege economisch risico
7. Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege groepsrisico (indicatief)
8. Overstromingskansbenadering: Resumé vereiste faalkans
9. Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans als signaleringswaarde, ondergrens en normklassen
10. Overstromingskansbenadering: Lengte-effect
11. Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans volgens overschrijdingskansbenadering
12. Overstromingskansbenadering: Aanwezige faalkans voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij semi-probabilistische rekenaanpak
13. Overstromingskansbenadering: Toetsoordelen faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts
14. Overstromingskansbenadering: Kadeverbetering als maatregel
15. Overstromingskansbenadering: Beperken verkeersbelasting als maatregel
16. Overstromingskansbenadering: Inzet van extra gemaalcapaciteit als maatregel
17. Overstromingskansbenadering: Inzet van boezemcompartimentering als maatregel

Bijlage 1: Overschrijdingskansbenadering: Toetsen op veiligheid voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Bij de toetsing is per dijkssectie één maatgevend profiel (doorsnede) gekozen voor de berekeningen. Het maatgevend profiel is naar verwachting het meest ongunstige profiel in de betreffende dijkssectie. Het maatgevend profiel is gekozen ter plaatse van de naar verwachting meest ongunstige bodemopbouw in de betreffende dijkssectie (Bijlsma & Tenhage, 2011). De effectieve schuifsterkteparameters zijn bepaald op basis van de Regionale proevenverzameling, aangevuld met waarden uit de NEN-EN 1997 (Kwakman & Haanstra, 2015).

Bij de toetsing op veiligheid is door Hollands Noorderkwartier voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts gerekend met een bovenbelasting (ongedraineerd gedragen: 0% consolidatie) van 13 kN/m² over een breedte van 2,50 m voor secties waar sprake is van een wegverharding. Dit is het geval voor de meeste dijkssecties rond polder Heerhugowaard. Voor secties waar sprake is van een groene kade, toegankelijk voor zwaar verkeer, is gerekend met een bovenbelasting (ongedraineerd gedragen: 0% consolidatie) van 5 kN/m² over een breedte van 2,50 m (Kwakman & Haanstra, 2015).

Figuur B1.1 bevat een voorbeeld van een berekening van de aanwezige stabiliteitsfactor voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts voor dijkssectie 5.



Figuur B1.1: Berekening aanwezige stabiliteitsfactor voor dijkssectie 5 (Kwakman & Haanstra, 2015)

Binnen de overschrijdingskansbenadering is gebruik gemaakt van een semi-probabilistische rekenaanpak. Hierbij is het gebruikelijk om te werken met partiële veiligheidsfactoren.

Voor de stabiliteitsfactor SF geldt als eis (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2015a):

$$SF \geq \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_b \quad (\text{B1.1})$$

met:

SF = stabiliteitsfactor, op basis van rekenwaarden van de sterkte-eigenschappen	[-]
γ_d = modelfactor	[-]
γ_n = schadefactor	[-]
γ_b = schematiseringsfactor	[-]

Bij gebruik van het rekenmodel van Bishop heeft Hollands Noorderkwartier een modelfactor γ_d gehanteerd van 1,00. Bij gebruik van het rekenmodel Uplift Van is een modelfactor γ_d van 1,05 gehanteerd voor de natte situatie, indien er sprake is van opdrijven van het achterland, en in andere situaties is een modelfactor γ_d van 1,00 gehanteerd (Kwakman & Haanstra, 2015).

Voor de schadefactor γ_n gelden de waarden zoals vermeld in Tabel B1.1.

Veiligheidsklasse	Schadefactor γ_n [-]
I	0,80
II	0,85
III	0,90
IV	0,95
V	1,00

Tabel B1.1: Vereiste schadefactor in relatie tot de veiligheidsklasse (Van der Meer et al., 1999, 2009)

Voor de toetsing heeft Hollands Noorderkwartier een schematiseringfactor γ_b toegepast van 1,05 (Kwakman & Haanstra, 2015).

Voor dijksecties waarbij de aanwezige stabiliteitsfactor lager was dan de vereiste stabiliteitsfactor, is met de restbreedtebenadering (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2015b) gekeken of alsnog een score voldoende kon worden toegekend (Kwakman & Haanstra, 2015). Als onderdeel van de restbreedtebenadering is gekeken of secundaire afschuivingen niet leiden tot aantasting van het profiel dat na het optreden van de macro-instabiliteit minimaal moet resteren. Door Hollands Noorderkwartier is voor dit minimum restprofiel als eis gesteld dat er op het niveau van de minimum kruinhoogte een kruinbreedte resteert van minimaal 1,5 m.

Het resulterende technisch oordeel voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts wordt weergegeven in Tabel B1.2.

Dijksectie	Vereiste stabiliteitsfactor doorsnede $SF_{vereist, dsn}$ [-]	Aanwezige stabiliteitsfactor doorsnede $SF_{aanw, dsn}$ [-]	Technisch oordeel
1	1,05	voldoet o.b.v. restbreedte	voldoende
2	1,05	2,37	voldoende
3	1,05	1,20	voldoende
4	1,05	0,83	onvoldoende
5	1,05	0,90	onvoldoende
6	1,05	1,01	onvoldoende
7	1,05	0,74	onvoldoende
8	1,05	0,90	onvoldoende
9	1,05	1,16	voldoende
9a	1,05	0,86	onvoldoende
10	1,05	1,26	voldoende
11	1,05	0,72	onvoldoende
12	1,05	2,41	voldoende
13	1,05	1,08	voldoende
14	1,05	voldoet o.b.v. geometrische toets	voldoende
15	1,05	1,22	voldoende
16	0,84	voldoet o.b.v. geometrische toets	voldoende
17	0,84	1,08	voldoende

Tabel B1.2: Technisch oordeel regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts (vrij naar Kwakman & Haanstra, 2015)

Bijlage 2: Overschrijdingskansbenadering: Dimensioneren verbetermaatregelen voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

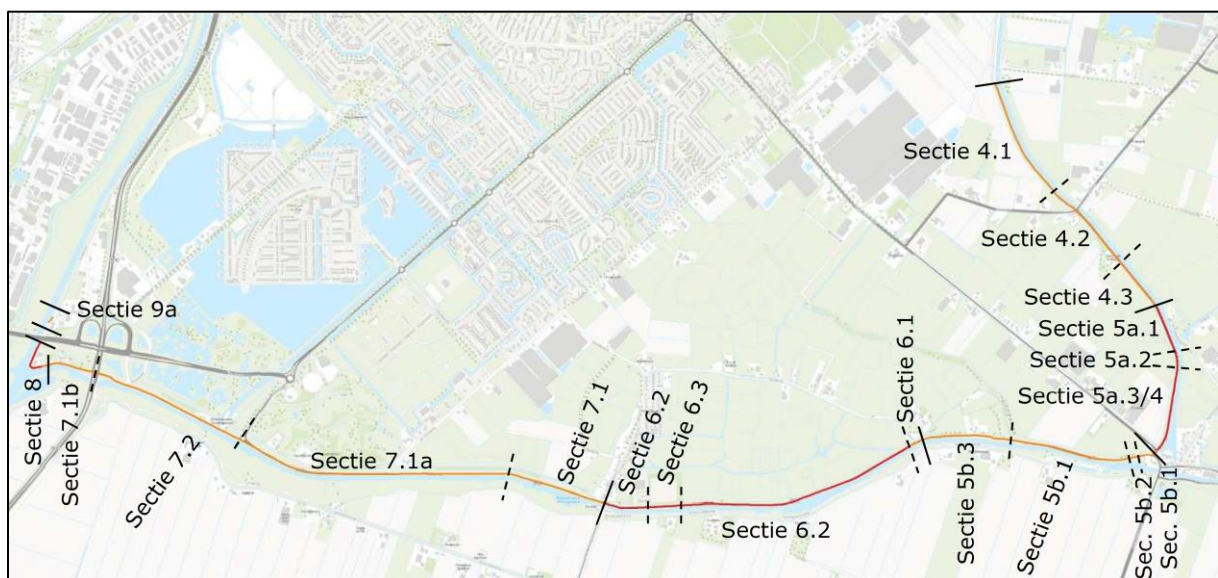
Bij het ontwerpen is door Hollands Noorderkwartier een planperiode ('ontwerplevensduur') gehanteerd van 30 jaar (Van den Herik, 2015; Van der Giessen, 2014).

Bij het ontwerpen zijn voor de modelfactor γ_d en voor de schadefactor γ_n dezelfde waarden gehanteerd als bij het toetsen op veiligheid (Van den Herik, 2015; Van der Giessen, 2014); zie hiervoor Bijlage 1.

Bij het ontwerpen is door Hollands Noorderkwartier een schematiseringfactor γ_b toegepast van 1,10 (Van den Herik, 2015; Van der Giessen, 2014).

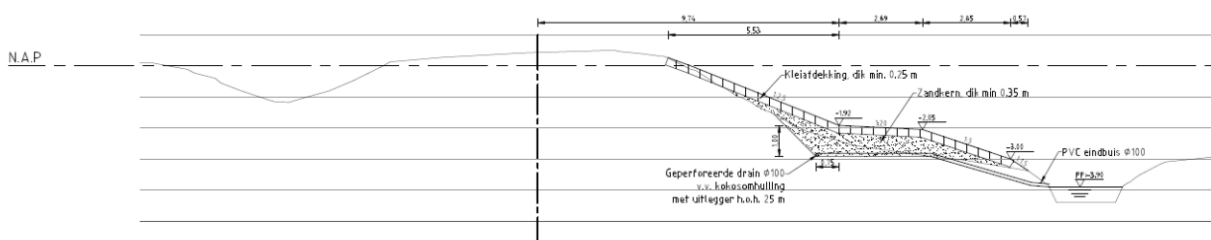
Hollands Noorderkwartier vereist dat de stabiliteitsfactor tijdens de uitvoering minimaal 80% (Van der Giessen, 2014) of 90% (Van den Herik, 2015) bedraagt van de stabiliteitsfactor in de eindsituatie.

Het dimensioneren van de verbetermaatregelen is met een groter detailniveau uitgevoerd dan de toetsing op veiligheid. Figuur B2.1 toont de onderscheiden dijkdeelsecties voor de verbeteringen buiten de Broekhornpolder.



Figuur B2.1: Ligging dijkdeelsecties binnen dijksectie 4 tot en met dijksectie 8 plus dijksectie 9a (Van den Herik, 2015)

Figuur B2.2 geeft een beeld van de uitgevoerde stabiliteitsverbetering.



Figuur B2.2: Kadeverbetering voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts in dijkdeelsectie 5b.2 (Van den Herik, 2015)

Tabel B2.1 geeft een overzicht van de met de kadeverbeteringen gerealiseerde stabiliteitsfactoren buiten de Broekhornpolder.

Dijksectie	Aanwezige stabiliteitsfactor doorsnede voor verbeteren $SF_{aanw, dsn, vóór}$ [-]	Vereiste stabiliteitsfactor doorsnede na verbeteren $SF_{vereist, dsn, na}$ [-]	Dijkdeelsectie	Aanwezige stabiliteitsfactor doorsnede voor verbeteren $SF_{aanw, dsn, vóór}$ [-]	Aanwezige stabiliteitsfactor doorsnede na verbeteren $SF_{aanw, dsn, na}$ [-]	Opmerking
4	0,83	1,10	4.1	0,82	1,13	
			4.2	0,84	1,14	
			4.2a	1,00	1,11	
			4.3	0,86	1,12	
5	0,90	1,10	5a.1	0,99	1,12	
			5a.2	0,75	1,12	
			5a.3	0,77	1,10	
			5a.4	0,88	1,10	
			5b.1	0,94	1,14	
			5b.2	0,92	1,13	
			5b.3	0,98	1,17	
6	1,01	1,10	6.1	0,65	n.v.t.	Aanbrengen stabiliteitsscherm
			6.2	0,97	1,13	
			6.3	1,17	1,17	Geen versterking nodig
7	0,74	1,10	7.1	0,61	1,10	
			7.1a	0,82	1,10	
			7.2	0,71	1,12	
			7.2a	0,76	1,13	
			7.1b	0,77	1,14	
8	0,90	1,10	8.1	1,01	1,14	
			8.2	0,87	1,11	
9a	0,86	1,10	9a	0,73	1,12	

Tabel B2.1: Stabiliteitsfactoren voor en na kadeverbetering dijkdeelsecties binnen dijksectie 4 tot en met dijksectie 8 plus dijksectie 9a regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts (Van den Herik, 2015)

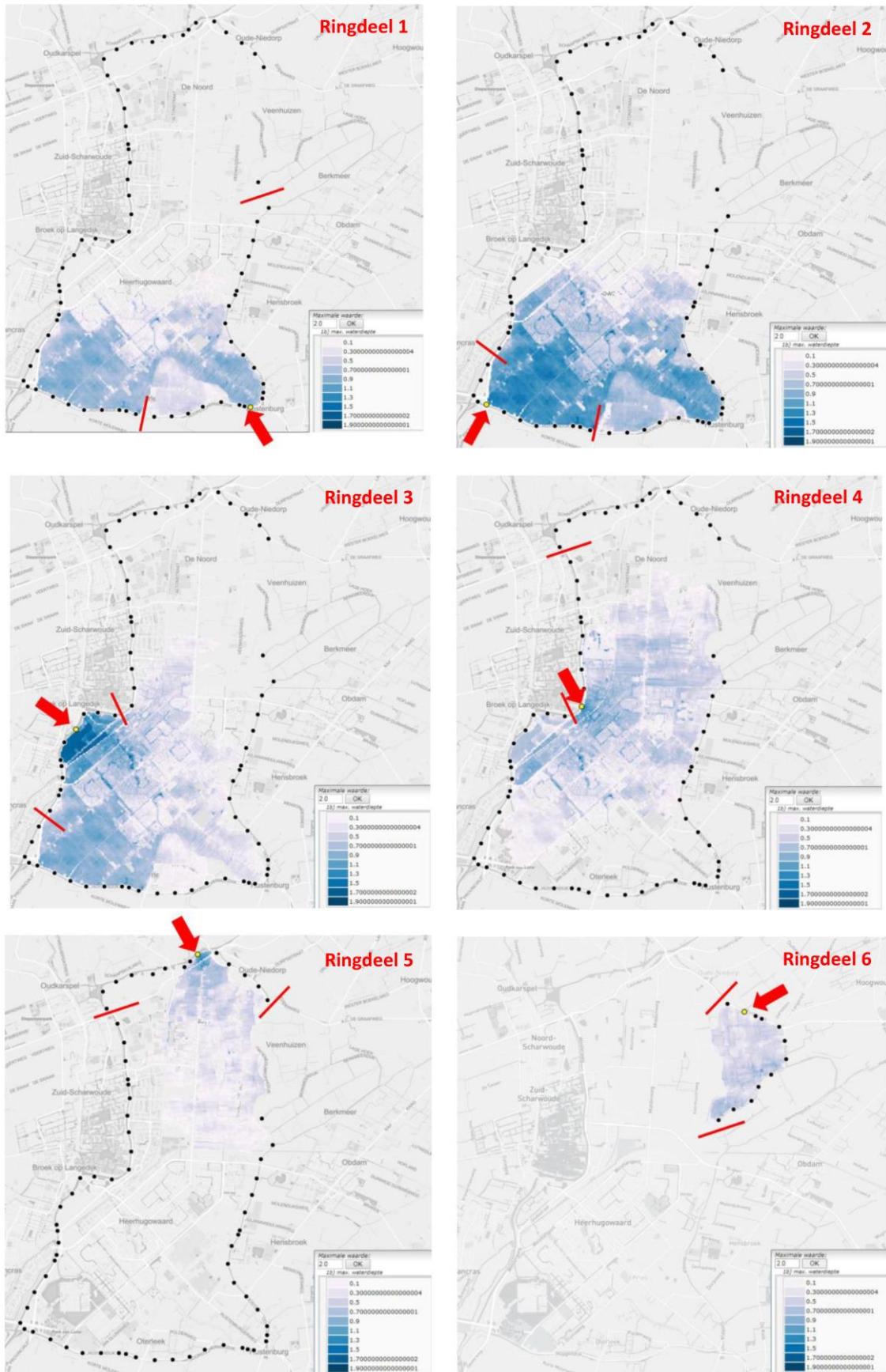
Bijlage 3: Overstromingsinformatie

Zoals toegelicht in paragraaf 4.3, bevat het informatiemodel Lizard Flooding overstromingsinformatie voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Deze informatie stamt uit 2011 en is gebaseerd op berekeningen met het modelinstrumentarium SOBEK (2D-berekeningen) en de schademethode HIS SSM (Schade en Slachtoffer Module). In aansluiting bij paragraaf 3.3, is als simulatieduur steeds 48 uur gehanteerd. De resultaten hiervan worden weergegeven in Tabel B3.1.

Ringdeel	Dijksectie	Boezemsysteem	Doorbraaklocatie	Schade [M€]	Slachtoffers	
1	1	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_3098	27,5	1	
	1	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_2583	29,2	1	
	1	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_2102	32,0	1	
	1	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_1678	33,7	1	
	2	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_1255	21,9	1	
	3	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_766	20,9	1	
	3	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_326	11,0	0	
	3	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_2561	11,3	0	
	4	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_2056	8,3	0	
	4	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_1644	3,6	0	
	4	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_1124	3,7	0	
	5	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_691	3,5	0	
	5	VRNK-boezem	Kanaal Rustenburg-Opmeer_345	3,4	0	
	5	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_243	174,2	8	
	5	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_543	162,5	7	
	5	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_1014	129,5	5	
	6	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_1486	126,1	5	
	6	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_1903	123,4	5	
	6	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_2345	125,4	5	
	6	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_2794	109,8	4	
2	7	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_3273	180,1	8	
	7	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_3698	199,4	9	
	7	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_4149	220,9	11	
	7	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_4601	270,0	14	
	7	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_5025	342,8	19	
	7	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_5472	404,6	24	
	7	Schermerboezem	Kanaal Huigendijk-Rustenburg_5960	591,3	39	
	8	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_2580	40,1	1	
	9	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_3006	421,9	26	
	9	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_3450	420,4	26	
3	10	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_3811	537,5	35	
	10	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_4359	488,9	31	
	10	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_4791	546,4	31	
	11	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_5267	646,0	36	
	11	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_5708	645,1	36	
	11	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_6164	646,5	36	
	11	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_6628	610,3	34	
	11	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_7032	642,9	36	
11	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_7563	611,0	34		
4	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_7938	628,0	32	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_8422	573,8	26	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_8915	508,9	20	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_9286	472,3	17	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_9737	446,3	17	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_10209	367,0	15	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_10659	283,3	10	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_11119	332,0	12	
	12	Schermerboezem	Kanaal Omval-Oudkarspel_11609	112,6	2	
	5	13	VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_216	0,0	0
13		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_678	12,5	0	
13		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_1196	15,9	0	
13		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_1598	15,6	0	
13		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_2069	15,7	0	
13		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_2458	16,1	0	
13		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_2887	28,8	1	
13		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_3350	32,9	1	
14		VRNK-boezem	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_3912	10,7	0	
14		VRNK-boezem	Wester Langereis, incl. Verlaat_512	21,6	1	
15		VRNK-boezem	Wester Langereis, incl. Verlaat_69	19,3	0	
15		VRNK-boezem	Wester Langereis_2022	23,7	1	
15		VRNK-boezem	Wester Langereis_1600	22,4	1	
6		16	VRNK-boezem	Wester Langereis_1600	3,9	0
		16	VRNK-boezem	Wester Langereis_1062	3,9	0
	16	VRNK-boezem	Wester Langereis_636	3,9	0	
	16	VRNK-boezem	Wester Langereis_166	1,6	0	
	17	VRNK-boezem	Korte Langereis, incl. Groot Mallegat_289	1,6	0	
	17	VRNK-boezem	Korte Langereis, incl. Klein Mallegat_192	1,8	0	
	17	VRNK-boezem	Ringvaart van de Berkmeer_2331	1,3	0	
	17	VRNK-boezem	Ringvaart van de Berkmeer_2786	1,0	0	
	17	VRNK-boezem	Ringvaart van de Berkmeer_3233	0,8	0	
	17	VRNK-boezem	Ringvaart van de Berkmeer_3697	0,7	0	
	17	VRNK-boezem	Ringvaart van de Berkmeer_4126	0,2	0	

Tabel B3.1: Gevolgen van doorbraak regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard (<https://flooding.lizard.net/>)

Per ringdeel zijn in Tabel B3.1 de doorbraaklocaties met de maximale gevolgen geel gemarkeerd. De overstromingspatronen van deze locaties worden getoond in Figuur B3.1.



Figuur B3.1: Overstromingspatronen polder Heerhugowaard met maximale gevolgen per ringdeel (<https://flooding.lizard.net/>)

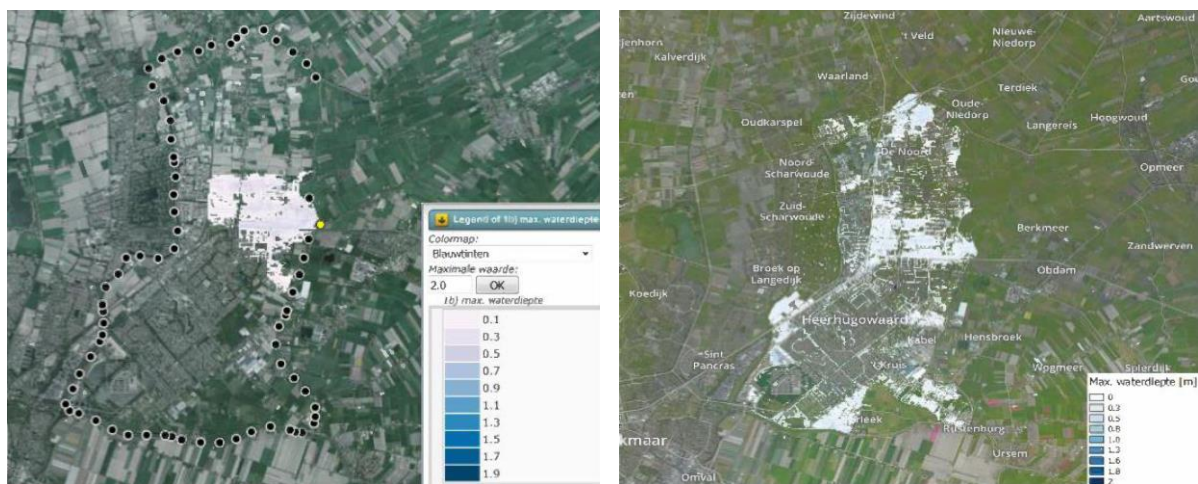
De in Tabel B3.1 vermelde schades zijn opgebouwd uit de som van directe fysieke schade aan objecten, directe schade doorbedrijfsuitval (productiestilstand en inkomensverlies binnen het getroffen gebied) en indirecte schade (productieverlies buiten het getroffen gebied) (Slager & Wagenaar, 2017).

Er zijn redenen om geen absolute waarde toe te kennen aan de in Tabel B3.1 vermelde gevolgen. De eerste reden hangt samen met het gebruikte overstromingsmodel en de tweede reden met de gebruikte schademethode.

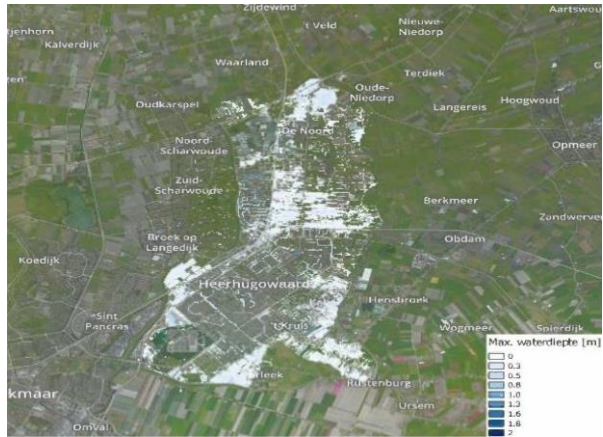
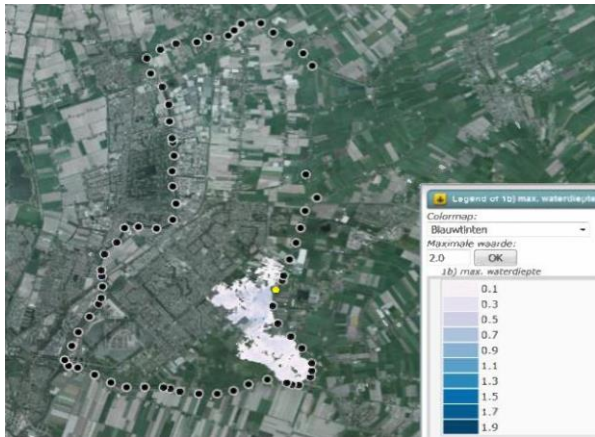
Overstromingsmodel:

De overstromingspatronen zoals getoond in Figuur B3.1 zijn, zoals eerder toegelicht, gegenereerd met 2D-berekeningen op basis van het modelinstrumentarium SOBEK. Bij een **2D-berekening** verspreidt het water zich na een doorbraak over het maaiveld van de polder. Dat proces verloopt relatief langzaam. Zeker in vergelijking met de snelle verspreiding die zich in werkelijkheid ook manifesteert: via de in de polder aanwezige waterlopen. Rekentechnisch kan het laatstgenoemde proces vorm krijgen via een 1D-berekening. Door het uitvoeren van een **1D2D-berekening** worden beide processen gekoppeld beschouwd. Met een 1D2D-berekening kan ook de invloed van lijnvormige elementen (zoals verhoogd liggende wegen) in de polder scherper in beeld worden gebracht. Daarvoor is essentieel dat de hierin aanwezige onderdoorgangen in het overstromingsmodel worden verwerkt. Deze onderdoorgangen kunnen immers het verschil maken tussen wel of niet overstroomd van een achterliggend stedelijk gebied.

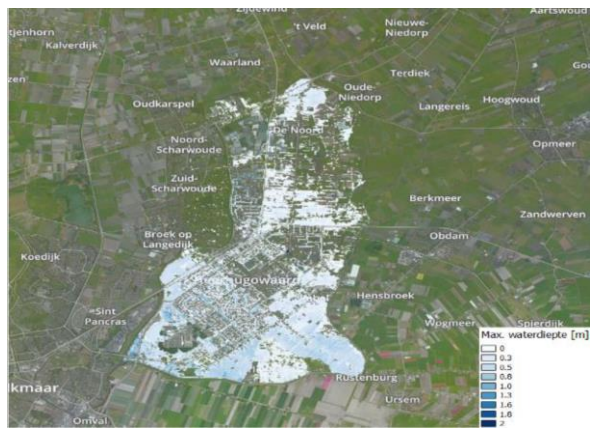
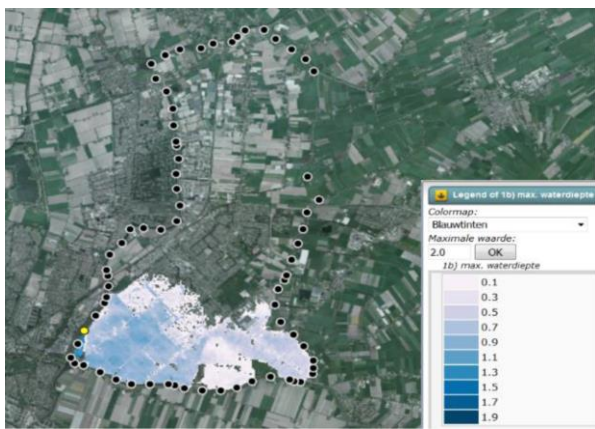
In 2016 is in opdracht van Hollands Noorderkwartier een verkenning uitgevoerd (Nelen & Schuurmans, 2016) om een beeld te verkrijgen van het verschil in overstromingspatroon bij 2D-berekeningen en 1D2D-berekeningen, in geval van doorbraak van regionale waterkeringen. De 1D2D-berekeningen zijn daarbij uitgevoerd met 3Di. Met 3Di konden destijds het bodemhoogtemodel, de verhoogde lijnvormige elementen en het stelsel waterlopen in de polder met een groter detailniveau worden geschematiseerd dan met SOBEK mogelijk was. Bij 3Di kon lokaal een raster van 5 m x 5 m worden gebruikt en bij SOBEK was dit standaard een raster van 25 m x 25 m. Het boezemsysteem is in 2016 niet in 3Di gemodelleerd: het bresdebiet werd als extra randvoorwaarde 'opgedrukt'. Bij de verkenning in 2016 zijn ook enkele doorbraaklocaties rond polder Heerhugowaard beschouwd. De resultaten worden getoond in Figuur B3.2 tot en met Figuur B3.7.



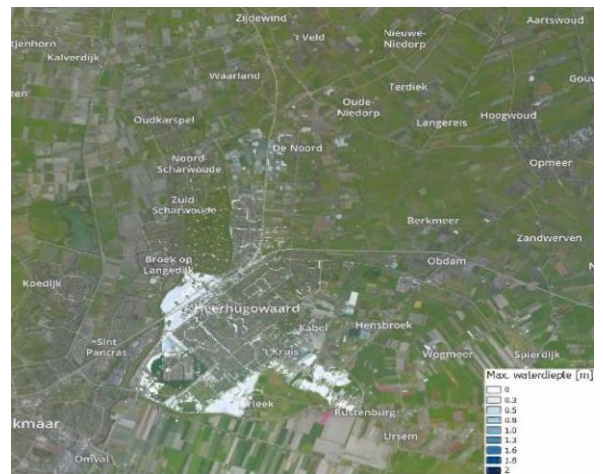
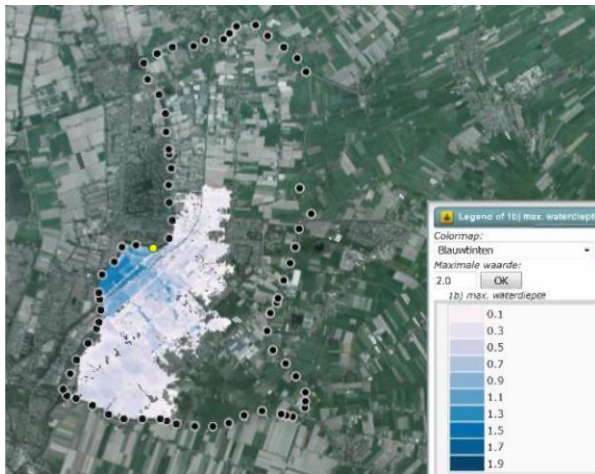
Figuur B3.2: Overstromingspatroon voor 2D-berekening (links) en 1D2D-berekening (rechts) voor doorbraaklocatie Kanaal Rustenburg-Opmeer_3098 (ringdeel 1, dijksectie 1) (Nelen & Schuurmans, 2016)



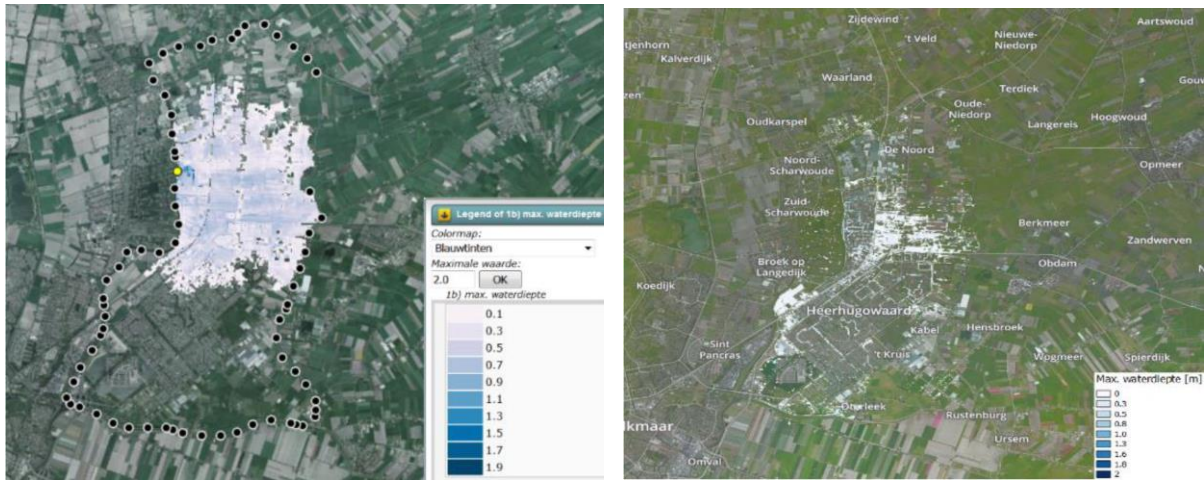
Figuur B3.3: Overstromingspatroon voor 2D-berekening (links) en 1D2D-berekening (rechts) voor doorbraaklocatie Kanaal Rustenburg-Opmeer_326 (ringdeel 1, dijksectie 3) (Nelen & Schuurmans, 2016)



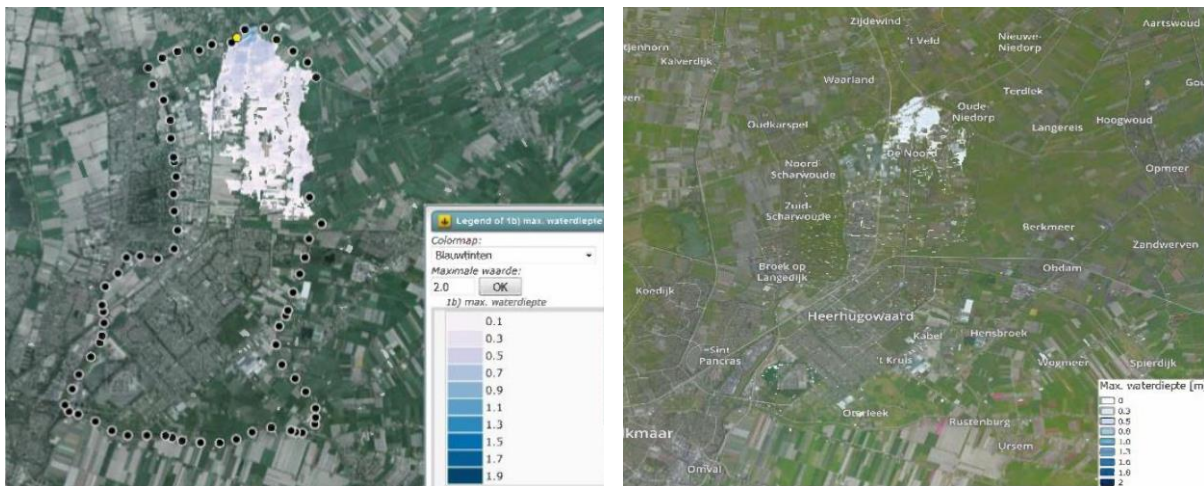
Figuur B3.4: Overstromingspatroon voor 2D-berekening (links) en 1D2D-berekening (rechts) voor doorbraaklocatie Kanaal Omval-Oudkarspel_3450 (ringdeel 2, dijksectie 9) (Nelen & Schuurmans, 2016)



Figuur B3.5: Overstromingspatroon voor 2D-berekening (links) en 1D2D-berekening (rechts) voor doorbraaklocatie Kanaal Omval-Oudkarspel_7563 (ringdeel 3, dijksectie 11) (Nelen & Schuurmans, 2016)



Figuur B3.6: Overstromingspatroon voor 2D-berekening (links) en 1D2D-berekening (rechts) voor doorbraaklocatie Kanaal Omval-Oudkarspel_9737 (ringdeel 4, dijksectie 12) (Nelen & Schuurmans, 2016)



Figuur B3.7: Overstromingspatroon voor 2D-berekening (links) en 1D2D-berekening (rechts) voor doorbraaklocatie Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_3103 (ringdeel 5, dijksectie 13) (Nelen & Schuurmans, 2016)

Figuur B3.2 tot en met Figuur B3.7 laten zien dat het water bij een 2D-berekening veel meer blijft 'hangen' nabij de doorbraaklocatie; bij een 1D2D-berekening verspreidt water zich verder door de polder en zijn de resulterende waterdiepten beperkter.

Een grotere verspreiding kan ongunstig zijn voor wat betreft de hoogte van de schade, hoewel een lagere waterdiepte op de schade juist weer een gunstig effect kan hebben.

De maximum waterdiepte bij de doorbraaklocatie is bij een 1D2D-berekening lager dan bij een 2D-berekening. De omgeving van de doorbraaklocatie is de in potentie gevaarlijkste plek voor wat betreft slachtoffers. Voor slachtoffer risico's vormt het hanteren van een 2D-berekening daarom naar verwachting een bovengrensbepaling.

Schademethode:

De overstromingsgevolgen zoals getoond in Tabel B3.1 zijn, zoals eerder toegelicht, berekend met de schademethode **(HIS) SSM (Schade en Slachtoffer Module)**. SSM is in opdracht van Rijkswaterstaat doorontwikkeld door Deltares (en werd oorspronkelijk ontwikkeld door Geodan en HKV). SSM is van oorsprong opgesteld om de gevolgen te bepalen van omvangrijke overstromingen, met waterdiepten van enkele meters (doorbraken van primaire waterkeringen). Vanwege de omvang van dit soort overstromingen berekent SSM de schade op basis van de vervangingswaarde van gebouwen. Ook maakt SSM onderscheid tussen wooncategorieën en verschillende bedrijfscategorieën (Slager & Wagenaar, 2017). Met ingang van 2017 kan SSM rekenen met verschillende detailniveaus: rasters

van 5 m x 5 m, 25 m x 25 m, 50 m x 50 m of 100 m x 100 m (Rijkswaterstaat, 2018). Daaraan voorafgaand werd voor de gebiedsinformatie standaard een raster van 100 m x 100 m gehanteerd.

Als alternatieve schademethode is de **Water Schade Schatter (WSS)** beschikbaar, die in opdracht van STOWA is ontwikkeld door Nelen & Schuurmans en Deltares (Nelen & Schuurmans, 2019). WSS is opgesteld om de schade van kleine overstromingen te bepalen die het gevolg zijn van extreme neerslag. De methode is beperkt tot overstromingen met een diepte van maximaal 0,3 m. WSS maakt onderscheid tussen verschillende typen landbouwgewassen. Vanwege de beperkte omvang van de beschouwde overstromingen berekent WSS de schade op basis van de herstelkosten van gebouwen. WSS berekent de schade standaard met een raster van 0,5 m x 0,5 m.

De waterdiepten bij een overstroming vanuit het regionale watersysteem liggen in tussen de waterdiepten waarvoor SSM en WSS zijn ontwikkeld. Als onderdeel van de in 2016 in opdracht van Hollands Noorderkwartier uitgevoerde verkenning (Nelen & Schuurmans, 2016), is ook een vergelijking gemaakt van de schade bij gebruik van (HIS) SSM en WSS. De resultaten van deze vergelijking worden getoond in Tabel B3.2.

Ringdeel	Dijksectie	Doorbraaklocatie	Schade [M€]			
			2D		1D2D	
			SSM	WSS	SSM	WSS
1	1	Kanaal Rustenburg-Opmeer_3098	19,6	33,2	110,9	160,0
1	3	Kanaal Rustenburg-Opmeer_326	9,6	33,1	104,2	156,0
2	9	Kanaal Omval-Oudkarspel_3450	157,7	211,0	258,3	303,1
3	11	Kanaal Omval-Oudkarspel_7563	420,3	698,8	51,2	84,9
4	12	Kanaal Omval-Oudkarspel_9737	300,7	973,3	64,5	58,8
5	13	Kanaal Oudkarspel-Kolhorn_3103	21,1	249,6	14,7	54,5

Tabel B3.2: Vergelijking schade polder Heerhugowaard bij gebruik van 2D- en 1D2D-overstromingsberekening en HIS SSM en WSS als schademethode

In overleg met Hollands Noorderkwartier is gekozen om uit te gaan van de schadegetallen behorend bij een 1D2D-overstromingsberekening en met gebruik van de schademethode SSM. Dit heeft, afgerond, per ringdeel geleid tot de schadebedragen zoals weergegeven in Tabel B3.3.

Ringdeel	Schade [M€]
1	110
2	260
3	55
4	65
5	15
6	3

Tabel B3.3: Resulterende schadebedragen per ringdeel polder Heerhugowaard

Samenvattend, blijkt het essentieel om de beschikking te hebben over betrouwbare overstromingsinformatie. Dit geldt zowel voor toepassing bij de overschrijdingskansbenadering als voor toepassing bij de overstromingskansbenadering.

Bijlage 4: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege individueel risico

Bij de normering van de primaire waterkeringen (Slootjes & Van der Most, 2016a, 2016b) werd als beleidsdoel gehanteerd om iedereen in Nederland achter dijken en duinen ten minste een beschermingsniveau van 10^{-5} per jaar te geven, basisveiligheid genoemd.

LIR:

Deze basisveiligheid is bij de normering van de primaire waterkeringen geoperationaliseerd via het Lokaal Individueel Risico (LIR). Het LIR is gedefinieerd als de kans per jaar om te overlijden op een bepaalde locatie door een overstroming, rekening houdend met de mogelijkheid van evacuatie. Er geldt:

$$\text{LIR} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \quad (\text{B4.1})$$

met:

LIR = kans op overlijden van een individu als gevolg van een overstroming	[1/jaar]
P_1 = kans op een overstroming	[1/jaar]
P_2 = kans op overlijden van een individu gegeven een overstroming ('mortaliteit')	[-]
P_3 = kans op aanwezigheid van een individu	[-]

Bij de toepassing van de overstromingskansbenadering op de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard is gekozen om de LIR-eis van 10^{-5} per jaar over te nemen. In combinatie met overstromingen vanuit het buitenwater, zoals de Noordzee, betekent deze keuze echter dat daarmee binnen de polder Heerhugowaard een samengestelde LIR-eis resulteert die ongunstiger is dan 10^{-5} per jaar.

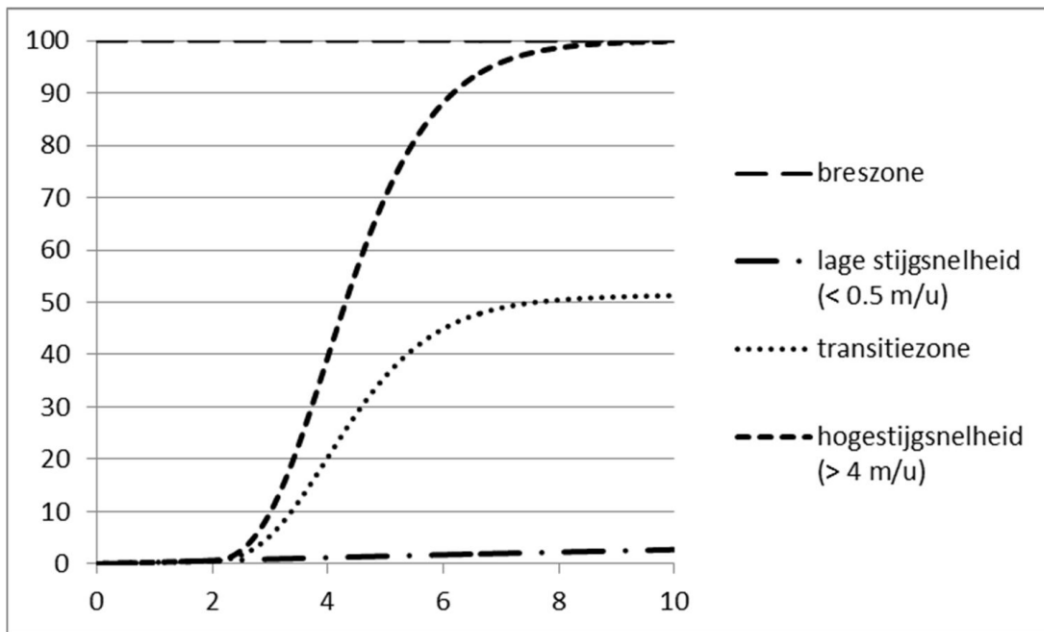
Mortaliteit:

In Nederland worden vier mortaliteitsfuncties gebruikt (Jonkman, 2007; Maaskant et al., 2009). Welke van de vier functies toegepast moet worden wordt bepaald door de karakteristieken van een overstroming. Deze karakteristieken zijn: de waterdiepte h (in m), de stijgsnelheid w over de eerste 1,5 m waterdiepte (in m/uur) en de stroomsnelheid v (in m/s).

Voor iedere mortaliteitsfunctie gelden de volgende omschrijvingen en criteria:

1. Het gebied nabij bij de bres (100-200m), met grote stroomsnelheden en grote combinatie van diepte en stroomsnelheid.
Voor dit gebied geldt: $h \times v \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$ en $v \geq 2 \text{ m/s}$.
2. Het gebied met grote stijgsnelheden.
Voor dit gebied geldt: ($h \geq 2,1$ en $w \geq 4$) en ($h \times v < 7 \text{ m}^2/\text{s}$ en $v < 2 \text{ m/s}$).
3. Het gebied tussen grote en lage stijgsnelheden in (transitiezone).
Voor dit gebied geldt: ($h \geq 2,1$ en $0,5 \leq w \leq 4$) en ($h \times v < 7 \text{ m}^2/\text{s}$ en $v < 2 \text{ m/s}$).
4. Het gebied met lage stijgsnelheden.
Voor dit gebied geldt: ($w < 0,5$) of ($w \geq 0,5$ en $h < 2,1$) en ($h \times v < 7 \text{ m}^2/\text{s}$ en $v < 2 \text{ m/s}$).

De mortaliteitsfuncties worden weergegeven in Figuur B4.1 (Slager & Wagenaar, 2017).



Figuur B4.1: Mortaliteitsfuncties met de waterdiepte (in m) op horizontale en de mortaliteit (in %) op de verticale as (in de transitiezone, bij stijgsnelheden tussen 0.5 m/u en 4 m/u, wordt de mortaliteitsfractie geïnterpoleerd)

Uit de overstromingskarakteristieken zoals weergegeven in Bijlage 3, blijkt dat overstromingsdiepen van 2,1 m of meer voor polder Heerhugowaard, zelfs bij toepassing van 2D-berekeningen, niet aan de orde zijn. Verder blijkt uit Figuur 2 dat de stedelijke functies in polder Heerhugowaard zich voor het overgrote deel op een grotere afstand dan 200 m van de regionale waterkering bevinden. Op basis hiervan is in overleg met Hollands Noorderkwartier geconcludeerd dat voor polder Heerhugowaard de mortaliteitsfunctie voor het gebied met een lage stijgsnelheden van toepassing is. Hiervoor geldt:

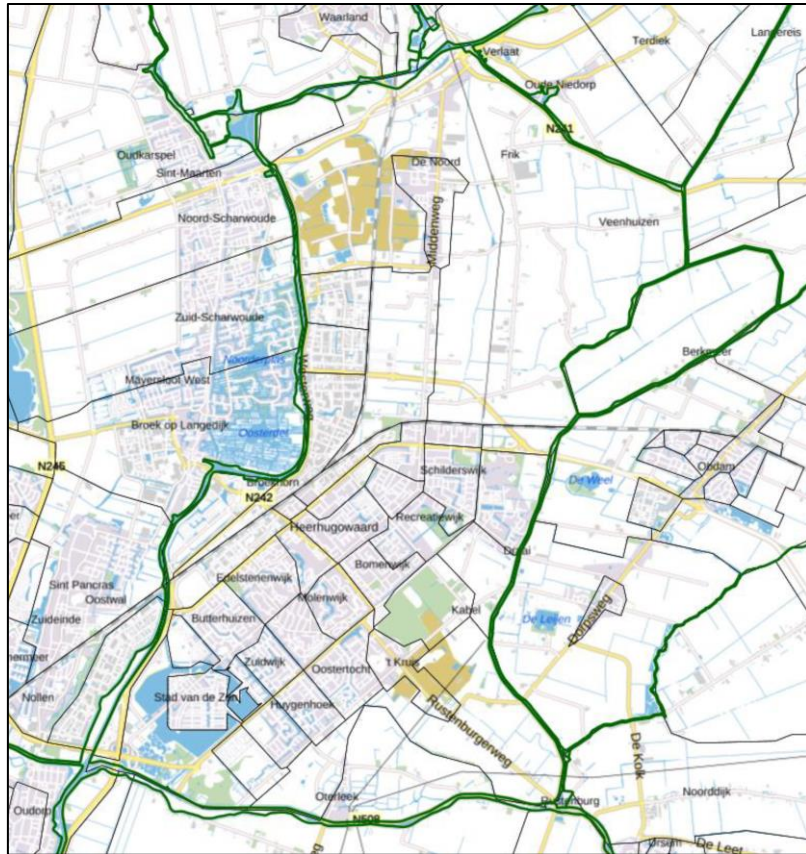
$$P_2(h) = \Phi_N(\{\ln(h) - \mu_N\}/\sigma_N) \quad \text{met: } \mu_N = 7,60 \text{ en } \sigma_N = 2,75 \quad (\text{B4.2})$$

met:

h = waterdiepte [m]

Φ_N = lognormale verdelingsfunctie, met parameters μ_N en σ_N

Bij de normering van de primaire waterkeringen zijn LIR-waarden berekend per buurt (Slootjes & Van der Most, 2016a). Wanneer dit uitgangspunt zou worden overgenomen voor polder Heerhugowaard, dan zou de onderverdeling in buurten resulteren zoals weergegeven in Figuur B4.2.



Figuur B4.2: Buurtindeling polder Heerhugowaard, inclusief stelsel van waterkeringen (<https://www.pdok.nl/viewer/>)

Vanwege de in Bijlage 3 vermelde aandachtspunten over de beschikbare overstromingsinformatie, is in overleg met Hollands Noorderkwartier gekozen om basisveiligheid voor polder Heerhugowaard niet op buurtniveau uit te werken.

Gekozen is voor een bovengrensbepijndering (zie Bijlage 3), door per overstromingssceario uit te gaan van de maximale waterstand op basis van een 2D-berekening. Deze maximale waterstanden zijn afgeleid van de in Figuur B3.1 opgenomen overstromingspatronen.

Tabel B4.1 geeft een overzicht van de gehanteerde waterdiepten en van de met vergelijking (B4.2) berekende mortaliteit.

Ringdeel	Geschatte waterdiepte h [m]	Mortaliteit P_2 [%]
1	0,7	0,19
2	1,3	0,38
3	1,5	0,44
4	0,9	0,25
5	1,1	0,32
6	0,1	0,02

Tabel B4.1: Berekende mortaliteit per ringdeel

Aanwezigheid:

De aanwezigheid van een individu wordt mede bepaald door de mogelijkheid van evacuatie. Er geldt:

$$P_3 = 1 - \text{evacuatiefractie} \quad (\text{B4.3})$$

De evacuatiefractie heeft hierbij betrekking op de fractie inwoners die bij dreigende overstroming preventief kan worden geëvacueerd. Preventief betekent: voorafgaand aan het falen van een waterkering. Gelet op de te verwachten waterdiepten, kan hieraan bij polder Heerhugowaard naar verwachting invulling worden gegeven door middel van verticale evacuatie.

Voor polder Heerhugowaard zijn, als gevoeligheidsberekening, twee evacuatiefracties in beschouwing genomen: 0% (geen preventieve evacuatie; relevant in geval van een onverwachte overstroming) en 50% (relevant in geval van een verwachte overstroming). Dit betekent, conform vergelijking (B4.3), respectievelijk: $P_3 = 1$ of $P_3 = 0,5$.

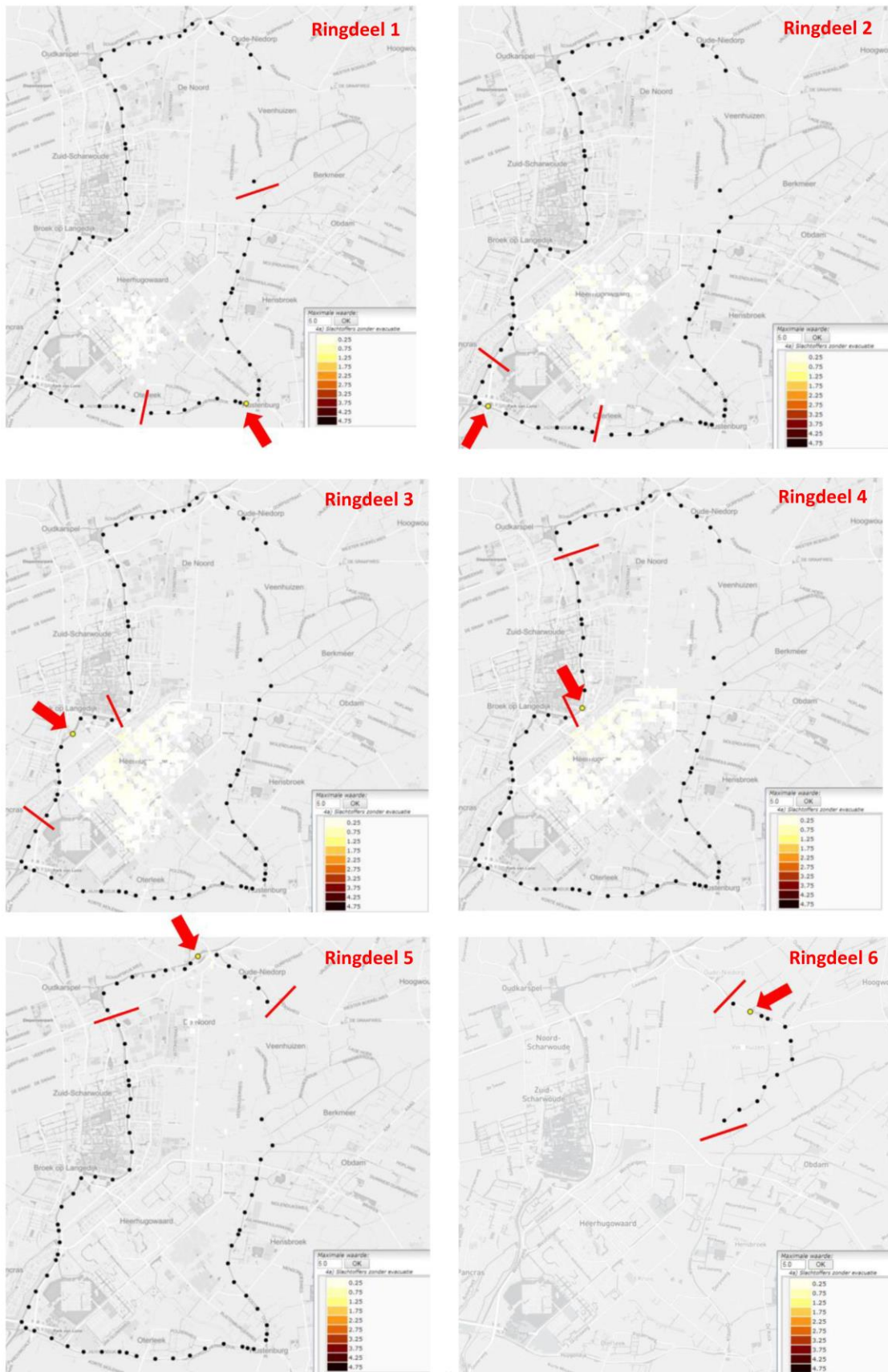
Vereiste faalkans:

Door invullen in vergelijking (B4.1) van de LIR-eis en van de waarden voor de mortaliteit P_2 en de kans op aanwezigheid P_3 , kan per ringdeel de vereiste faalkans P_1 van de regionale waterkering vanwege individueel risico worden berekend.

Voor de uitwerking is relevant dat het LIR op sommige locaties wordt beïnvloed door een doorbraak in meerdere ringdelen. Figuur B4.3 bevat de mortaliteitspatronen. Hieruit blijkt dat ringdeel 5 en ringdeel 6 op zichzelf staan, maar dat het LIR in het stedelijk gebied van Heerhugowaard wordt bepaald door doorbraken in ringdeel 1, ringdeel 2, ringdeel 3 en ringdeel 4. In die situatie geldt voor het LIR niet meer vergelijking (B4.1), maar moet gebruik worden gemaakt van de algemener geldige vergelijking (B4.4).

$$\text{LIR} = \sum_{i=1}^4 P_{1,i} \cdot P_{2,i} \cdot P_{3,i} \quad (\text{B4.4})$$

Hierbij is aangehouden dat doorbraken van de betreffende ringdelen onafhankelijke gebeurtenissen zijn. Dit in lijn met Bijlage 10, waarin zal worden toegelicht dat onderlinge onafhankelijkheid tussen dijksecties als uitgangspunt is gehanteerd. Verder zijn, vanwege de kleine resulterende kansbijdragen, meervoudige doorbraken van ringdelen buiten beschouwing gelaten.



Figuur B4.3: Mortaliteitspatronen polder Heerhugowaard per ringdeel (<https://flooding.lizard.net/>)

Het gedeeltelijk samenvallen van de mortaliteitspatronen is in de gevolgte bovengrensbenadering verwerkt door voor zowel ringdeel 1, ringdeel 2, ringdeel 3 als ringdeel 4 uit te gaan van dezelfde

mortaliteit P_2 , namelijk de waarde voor ringdeel 3. De ringdelen 1 tot en met 4 worden daarmee, als tussenstap, als één ringdeel beschouwd. Tabel B4.2 bevat de na correctie gevonden mortaliteit per ringdeel.

Ringdeel	Mortaliteit P_2 [%]
1 t/m 4	0,44
5	0,32
6	0,02

Tabel B4.2: Gecorrigeerde mortaliteit per ringdeel

Door combinatie van vergelijking (B4.1), vergelijking (B4.3), de waarden in Tabel B4.2 en de LIR-eis van 10^{-5} is vervolgens de vereiste faalkans P_1 berekend. De toedeling naar de ringdelen 1 tot en met 4 is daarna gebeurd naar verhouding van de respectievelijke lengten van deze ringdelen (conform Tabel B6.2), vertaald in de conditionele kansen zoals te zien in Tabel B4.3.

Ringdeel	Lengte [m]	Condionele kans [-]
1	8.710	0,41
2	4.330	0,20
3	4.025	0,19
4	4.420	0,21
	21.485	1,00

Tabel B4.3: Conditionele kans ringdeel 1 t/m 4

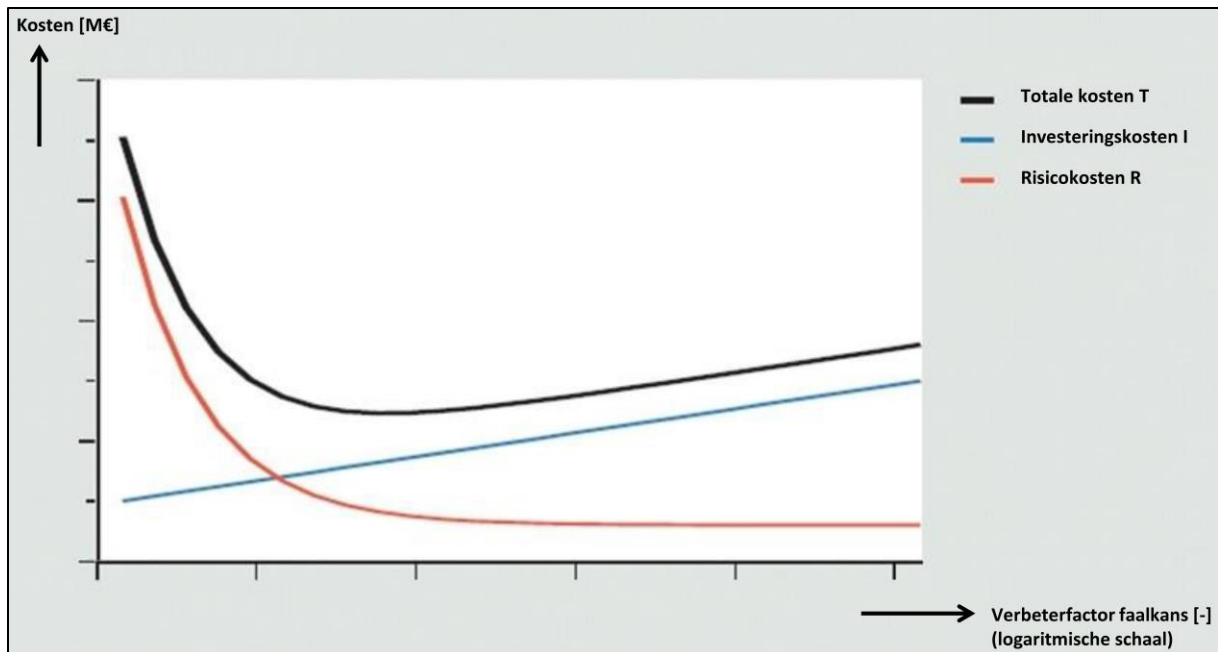
Bij de toedeling is de vereiste faalkans P_1 voor het gezamenlijke ringdeel 1 t/m 4 vermenigvuldigd met de conditionele kans per afzonderlijk ringdeel. De vereiste faalkans P_1 is daarna hernoemd tot $P_{f\text{-vereist, LIR}}$. Het resultaat is te zien in Tabel B4.4.

Ringdeel	Vereiste faalkans vanwege basisveiligheid $P_{f\text{-vereist, LIR}}$ [1/jaar]	
	evacuatie- fractie 0%	evacuatie- fractie 50%
1	1/1.097	1/548
2	1/2.206	1/1.103
3	1/2.373	1/1.187
4	1/2.161	1/1.081
5	1/318	1/159
6	1/16	1/8

Tabel B4.4: Vereiste faalkans regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard vanwege individueel risico

Bijlage 5: Overstromingskansbenadering: Analytische afleiding economisch optimale faalkans bij kadeverbetering

Door meer te investeren in de betrouwbaarheid van waterkeringen neemt het overstromingsrisico af. De investeringskosten en de risicokosten vormen samen de totale kosten. Door de totale kosten te minimaliseren kan de economisch optimale faalkans van waterkeringen worden bepaald. Dit principe is voor het eerst in de praktijk gebracht door Van Dantzig (Deltacommissie, 1960) en wordt schematisch weergegeven in Figuur B5.1.



Figuur B5.1: Principe kosten-batenanalyse

In Figuur B5.1 geldt:

$$T = I + R \quad (B5.1)$$

met:

T = totale kosten	[M€]
I = investeringskosten (kadeverbetering)	[M€]
R = risicokosten (contante waarde)	[M€]

Verder geldt:

$$I = I_{\text{vast}} + I_{\text{variabel}} \cdot {}^{10}\log(\text{verbeterfactor faalkans}) \quad (B5.2)$$

met:

I_{vast} = vaste investeringskosten, die niet afhangen van de mate waarin de kade wordt verbeterd	[M€]
I_{variabel} = variabele investeringskosten, die juist wel afhangen van de mate waarin de kade wordt verbeterd	[M€/dh]

Bij de vaste investeringskosten gaat het bijvoorbeeld om de plankosten, de mobilisatiekosten van de aannemers of de vervangingskosten van een weg op een kade. De variabele investeringskosten hangen bijvoorbeeld af van de hoeveelheden grond die afgevoerd en/of aangevoerd moeten worden.

In Figuur B5.1 komt I_{vast} overeen met de hoogte waarop de blauwe lijn de verticale as snijdt en komt $I_{variabel}$ overeen met de hellingshoek van de blauwe lijn.

In de eenheid van de variabele investeringskosten heeft dh betrekking op de decimeringshoogte: de verbetering van de aanwezige faalkans met een factor 10.

Er is ieder jaar opnieuw een risico van overstroming. Om dit door de tijd verspreide risico te kunnen vergelijken met de investeringskosten die op een bepaald moment worden gemaakt, worden de jaarlijkse risico's teruggerekend naar ditzelfde moment. Dit contant maken gebeurt met een vast percentage per jaar: de discontovoet r . Er geldt:

$$R = [(P_{f-aanw}/\text{verbeterfactor faalkans}) \cdot S]/r \quad (B5.3)$$

met:

P_{f-aanw}	= aanwezige faalkans waterkering	[1/jaar]
S	= schade bij overstroming	[M€]
r	= discontovoet	[%/jaar]

Invullen van vergelijking (B5.2) en vergelijking (B5.3) in vergelijking (B5.1) geeft:

$$T = I_{vast} + I_{variabel} \cdot {}^{10}\log(\text{verbeterfactor faalkans}) + [(P_{f-aanw}/\text{verbeterfactor faalkans}) \cdot S]/r \quad (B5.4)$$

Gezocht wordt naar de verbeterfactor waarbij de totale kosten T minimaal zijn, ofwel:

$$dT/d(\text{verbeterfactor faalkans}) = 0 \quad (B5.5)$$

Na differentiëren van vergelijking (B5.4) en invullen in vergelijking (B5.5) volgt:

$$I_{variabel} \cdot (1/\text{verbeterfactor faalkans}) \cdot 1/\ln(10) - [(P_{f-aanw}/\{\text{verbeterfactor faalkans}\}^2) \cdot S]/r = 0 \quad (B5.6)$$

Hieruit volgt:

$$(\text{verbeterfactor faalkans})_{optimaal} = [P_{f-aanw} \cdot S \cdot \ln(10)]/[r \cdot I_{variabel}] \quad (B5.7)$$

Daarmee geldt voor de vereiste faalkans van de waterkering vanwege economische optimalisatie:

$$\begin{aligned} P_{f-vereist, KBA} &= P_{f-aanw}/(\text{verbeterfactor faalkans})_{optimaal} \\ &= [r \cdot I_{variabel}]/[S \cdot \ln(10)] \end{aligned} \quad (B5.8)$$

Merk op dat de waarde van $P_{f-vereist, KBA}$ noch afhangt van de waarde van de aanwezige faalkans van de waterkering P_{f-aanw} , noch van de grootte van de vaste investeringskosten I_{vast} .

En verder geldt dat zowel de discontovoet r , als de variabele investeringskosten $I_{variabel}$, als de schade bij overstroming S lineair in de formule voor $P_{f-vereist, KBA}$ voorkomen.

Wanneer voor de discontovoet r een waarde van 5,5% per jaar wordt gehanteerd, net zoals bij het afleiden van de economisch optimale normering van de primaire waterkeringen is gebeurd (Kind, 2011), dan volgt na invullen in vergelijking (B5.8):

$$P_{f\text{-vereist, KBA}} \approx (1/42) \cdot I_{\text{variabel}}/S \quad (\text{B5.9})$$

Dit is gelijk (Slootjes & Van der Most, 2016b) aan de uitdrukking die langs andere weg is afgeleid door Eijgenraam (Eijgenraam, 2011).

Bijlage 6: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege economisch risico

Zoals toegelicht in Bijlage 5, is voor het bepalen van de vereiste faalkans vanwege economisch risico inzicht nodig in zowel de variabele kosten van kadeverbetering, als de omvang van schade bij overstroming.

Kosten van kadeverbetering:

Volgens opgave van Hollands Noorderkwartier bedragen de kosten van de in Bijlage 2 beschreven kadeverbeteringen 0,40 M€/km. En volgens opgave van Hollands Noorderkwartier bestaan deze kosten voor 80% uit variabele kosten.

Daarmee resteert de vraag hoe groot de verbetering van de aanwezige faalkans is die met de kadeverbetering is (en deels nog zal worden) gerealiseerd. Daartoe is Tabel B6.1 opgesteld, op het niveau van dijkdeelsecties. Tabel B6.1 is opgesteld met als vertrekpunt de aanwezige stabiliteitsfactoren voor en na kadeverbetering van ringdeel 1 en 2, zoals vermeld in Tabel B2.1. Deze beide sets met stabiliteitsfactoren zijn omgerekend in de aanwezige faalkansen voor en na kadeverbetering. [Dat is mogelijk omdat ook aan de overschrijdingskansbenadering overstromingskansen ten grondslag liggen. Figuur 11 in paragraaf 3.3 laat zien dat uitgangspunt is dat de faalkans van een boezemkadevak 20% bedraagt van de kans op overschrijding van het maatgevend boezempeil. Per faalmechanismen gelden er veiligheidseisen. Voor de grondmechanische faalmechanismen zijn deze veiligheidseisen vertaald in partiële veiligheidsfactoren; in Bijlage 1 is dit toegelicht voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts.](#)

[Het werken met partiële veiligheidsfactoren behoort bij een semi-probabilistische rekenaanpak. Er bestaat een directe relatie tussen de partiële veiligheidsfactoren en de vereiste faalkans \(Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2015a\). Voor boezemkaden is deze relatie voor macrostabiliteit binnenwaarts uitgewerkt \(Van der Meer et al., 2009\). Er geldt:](#)

$$\beta = 6,24 \cdot \gamma_n - 2,78 \quad (B6.1)$$

met:

$$\begin{aligned} \beta &= \text{betrouwbaarheidsindex} && [-] \\ \gamma_n &= \text{schadefactor} && [-] \end{aligned}$$

[Vergelijking \(B6.1\) is van toepassing op een toetsing op veiligheid voor het faalmechanisme stabiliteit binnenwaarts bij gebruik van een bijbehorende set materiaalfactoren behorend bij gedraineerde sterkte-eigenschappen en bij gebruik van een schematiseringsfactor \(Van der Meer et al., 2009\). Dat sluit aan bij de wijze waarop dit faalmechanisme door Hollands Noorderkwartier is gehanteerd voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard.](#)

[Verder geldt:](#)

$$P_f = \phi(-\beta) \quad (B6.2)$$

met:

$$P_f = \text{faalkans} \quad [1/\text{jaar}]$$

ϕ = standaardnormale verdelingsfunctie

Met de combinatie van vergelijking (B6.1) en (B6.2) is het mogelijk om de aanwezige stabiliteitsfactor voor en na kadverbetering (zie Tabel B2.1) om te rekenen naar de aanwezige faalkans.

Ringdeel	Dijksectie	Dijkdeelsectie	Aanwezige stabiliteitsfactor voor verbetering $SF_{aanw, dir, v\ddot{o}r}$	Aanwezige schade-factor voor verbetering $V_{s, aanw, dir, v\ddot{o}r}$ ($V_0 = 1,05$)	Aanwezige betrouwbaarheidsindex voor verbetering $\beta_{aanw, dir, stab, b\ddot{u}t, v\ddot{o}r}$	Aanwezige faalkans doorsnede, stabiliteit binnenwaarts voor verbeteren $P_{faalkans, dir, stab, b\ddot{u}t, semi, prob, v\ddot{o}r}$ [1/jaar]	Aanwezige stabiliteitsfactor na verbetering $SF_{aanw, dir, na}$	Aanwezige schade-factor na verbetering $V_{s, aanw, dir, na}$ ($V_0 = 1,05$)	Aanwezige betrouwbaarheidsindex na verbetering $\beta_{aanw, dir, stab, b\ddot{u}t, na}$	Aanwezige faalkans doorsnede, stabiliteit binnenwaarts na verbeteren $P_{faalkans, dir, stab, b\ddot{u}t, semi, prob, na}$ [1/jaar]	Vergrotingsfactor faalkans
1	4	4.1	0,82	0,78	2,09	1/55	1,13	1,08	3,94	1/24.082	438
		4.2	0,84	0,80	2,21	1/74	1,14	1,09	3,99	1/30.896	417
	5	4.2a	1,00	0,95	3,16	1/1380	1,11	1,06	3,82	1/14.780	13
		4.3	0,86	0,82	2,33	1/101	1,12	1,07	3,88	1/18.835	186
		5a.1	0,99	0,94	3,10	1/1.046	1,12	1,07	3,88	1/18.835	18
		5a.2	0,75	0,71	1,68	1/21	1,12	1,07	3,88	1/18.835	881
		5a.3	0,77	0,73	1,80	1/28	1,10	1,05	3,76	1/11.637	422
		5a.4	0,88	0,84	2,45	1/140	1,10	1,05	3,76	1/11.637	83
		5b.1	0,94	0,90	2,81	1/399	1,14	1,09	3,99	1/30.896	77
		5b.2	0,92	0,88	2,69	1/278	1,13	1,08	3,94	1/24.082	87
2	6	6.2	0,98	0,93	3,04	1/857	1,17	1,11	4,17	1/66.572	78
		6.3	0,97	0,92	2,98	1/704	1,13	1,08	3,94	1/24.082	34
	7	7.1	0,61	0,58	0,85	1/5	1,10	1,05	3,76	1/11.637	2.316
		7.1a	0,82	0,78	2,09	1/55	1,10	1,05	3,76	1/11.637	211
		7.2	0,71	0,68	1,44	1/13	1,12	1,07	3,88	1/18.835	1.413
		7.2a	0,76	0,72	1,74	1/24	1,13	1,08	3,94	1/24.082	993
		7.1b	0,77	0,73	1,80	1/28	1,14	1,09	3,99	1/30.896	1.120
		8.1	1,01	0,96	3,22	1/1.573	1,14	1,09	3,99	1/30.896	20
		8.2	0,87	0,83	2,39	1/119	1,11	1,06	3,82	1/14.780	124
		9a	0,73	0,70	1,56	1/17	1,12	1,07	3,88	1/18.835	1.122
gemiddeld:											
503											

Tabel B6.1: Verbeterfactoren door kadverbetering regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard

Uit de zo verkregen sets met aanwezige faalkansen zijn vervolgens, op het niveau van dijkdeelsecties, de verbeterfactoren voor de faalkans berekend. Op deze wijze is gebleken dat met de in Bijlage 2 beschreven kadeverbeteringen gemiddeld een verbeteringsfactor van iets meer dan 500 is gerealiseerd. Dat betekent gemiddeld een faalkansverbetering met 2,7 decimeringshoogten.

Daarmee bedragen de variabele investeringskosten $80\% \cdot 0,40 \text{ M€}/\text{km}/2,7 \text{ dh} = 0,12 \text{ M€}/\text{km}/\text{dh}$

Dit leidt tot de volgende kostenkengetallen:

$$I_{\text{vast}} = 0,28 \text{ M€}/\text{km}$$

$$I_{\text{variabel}} = 0,12 \text{ M€}/\text{km}/\text{dh}$$

Bij een kadeverbetering waarbij de aanwezige faalkans precies met 1 decimeringshoogte (een verbeteringsfactor van 10) wordt verbeterd, bestaan de verbeterkosten voor ongeveer 70% uit vaste kosten en ongeveer 30% uit variabele kosten.

De lengten van de verschillende ringdelen staan vermeld in Tabel B6.2.

Ringdeel	Dijksectie	Lengte [m]		
		Dijksectie	Ringdeel	Totaal
1	1	1.520	8.710	31.999
	2	465		
	3	1.345		
	4	1.485		
	5a	820		
	5b	1.285		
6	1.790			
2	7	3.175	4.330	
	8	200		
	9	920		
	9a	35		
3	10	1.500	4.025	
	11	2.525		
4	12	4.420	4.420	
5	13	3.700	5.640	
	14	730		
	15	1.210		
6	16	1.554	4.874	
	17a	1.040		
	17b	2.280		

Tabel B6.2: Lengten dijksecties en ringdelen regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard

Schade bij overstroming:

Er is gebruik gemaakt van de schadebedragen zoals vermeld in Tabel B3.3.

Vanwege de beperkte waterdiepten na overstroming, is in overleg met Hollands Noorderkwartier geconcludeerd dat de in Tabel B3.1 vermelde slachtofferaantallen onvoldoende onderbouwing hebben voor toepassing.

Discontovoet:

Er is gebruik gemaakt van de waarde die ook is gebruikt in het kader van de normering voor de primaire waterkeringen (Kind, 2011): 5,5% per jaar.

Daarmee zijn alle invoergegevens beschikbaar die nodig zijn om, op de in Bijlage 5 beschreven wijze, de vereiste faalkans vanwege economisch risico te berekenen. Daarbij zijn twee situaties doorgerekend: de 'situatie 2020' en de 'situatie 2050'. De laatstgenoemde uitgaande van de voor regionale waterkeringen gebruikelijke ontwerp levensduur van 30 jaar (zie ook Bijlage 2). De 'situatie 2050' vormt het vertrekpunt om voor de regionale waterkeringen een robuuste normering af te

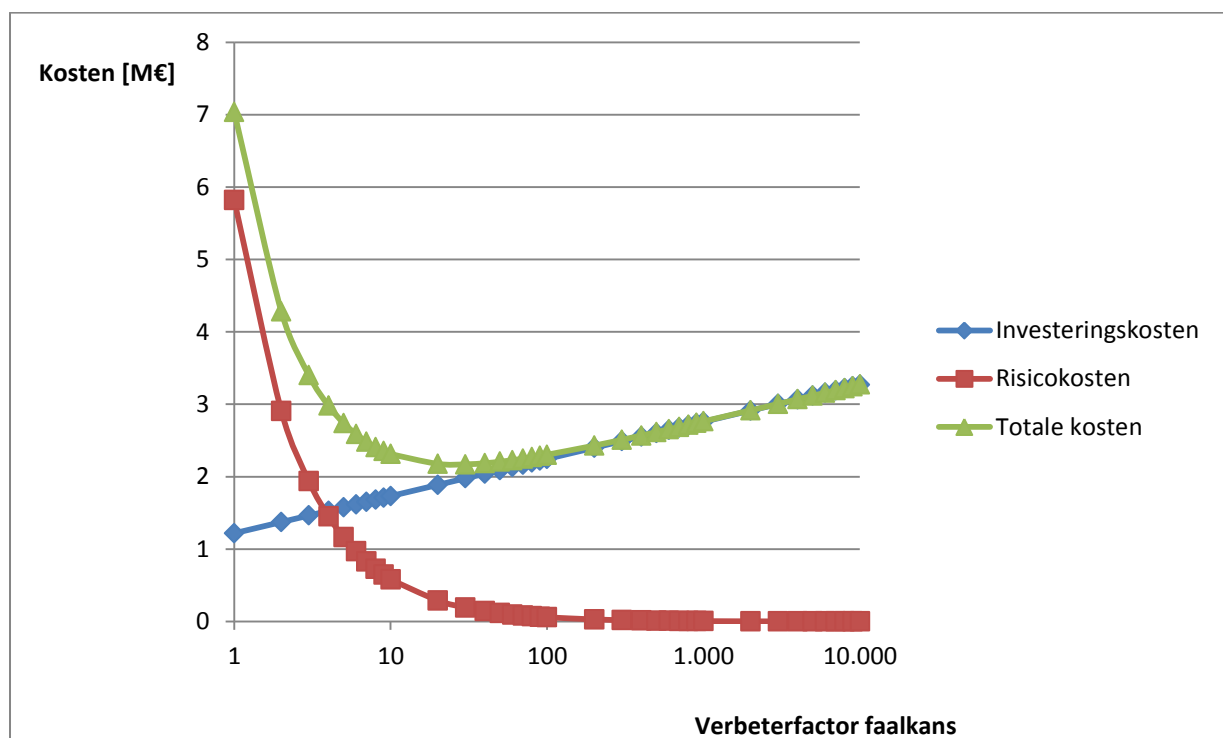
leiden. Voor de 'situatie 2050' is, net als bij de normering van de primaire waterkeringen (Kind, 2011), uitgegaan van een economische groei van 1,9% per jaar. Daarmee nemen de gevolgen van een overstroming in de tijd langzaam toe.

Het resultaat van de berekening wordt weergegeven in Tabel B6.3.

Ringdeel	Lengte [m]	Vereiste faalkans vanwege economisch risico $P_{F\text{-vereist, KBA}}$ [1/jaar]	
		'situatie 2020'	'situatie 2050'
1	8.710	1/4.461	1/7.846
2	4.330	1/21.211	1/37.306
3	4.025	1/4.827	1/8.490
4	4.420	1/5.195	1/9.137
5	5.640	1/939	1/1.652
6	4.874	1/217	1/382

Tabel B6.3: Vereiste faalkans regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard vanwege economisch risico

Figuur B6.1 toont een grafiek die is opgesteld voor de kosten-batenanalyse.



Figuur B6.1: Grafiek kosten-batenanalyse ringdeel 2 van regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard, voor 'situatie 2050'

Merk op dat Tabel B6.3 voor ieder ringdeel de vereiste faalkans weergeeft voor de totale lengte van dat ringdeel. Dit betekent dat de getalswaarde voor de vereiste faalkans steeds moeten worden beschouwd in relatie tot de lengte van het beschouwde ringdeel. Dan blijkt bijvoorbeeld dat de vereiste faalkans voor ringdeel 1 qua uitwerking strenger is dan de vereiste faalkans voor ringdeel 4, hoewel de getalswaarden van de vereiste faalkansen bij een eerste blik mogelijk anders kunnen doen vermoeden. Dit fenomeen maakt het ook lastiger om de getalswaarden van de vereiste faalkansen direct te vergelijken met de normering voor de primaire waterkeringen van Hollands Noorderkwartier; bij de normering voor de primaire waterkering betreft het vaak dijktrajecten met een lengte van 20 tot 30 km.

Bijlage 7: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans vanwege groepsrisico (indicatief)

Vanuit maatschappelijk perspectief is het van belang om te kijken naar de kans op een groot aantal slachtoffers in één overstroming: het groepsrisico. Voor de normering van de primaire waterkeringen is het groepsrisico beschouwd voor Nederland als geheel (Slootjes & Van der Most, 2016a). Daarbij zijn de eisen voor groepsrisico gebaseerd op de oriëntatielijnen uit het TAW-beoordelingskader (Vrijling, 1985). Voor de vereiste faalkans vanwege groepsrisico geldt:

$$P_{f\text{-vereist, GR}} = [(\beta \cdot 100/k)^2]/N^2 \quad (\text{B7.1})$$

met:

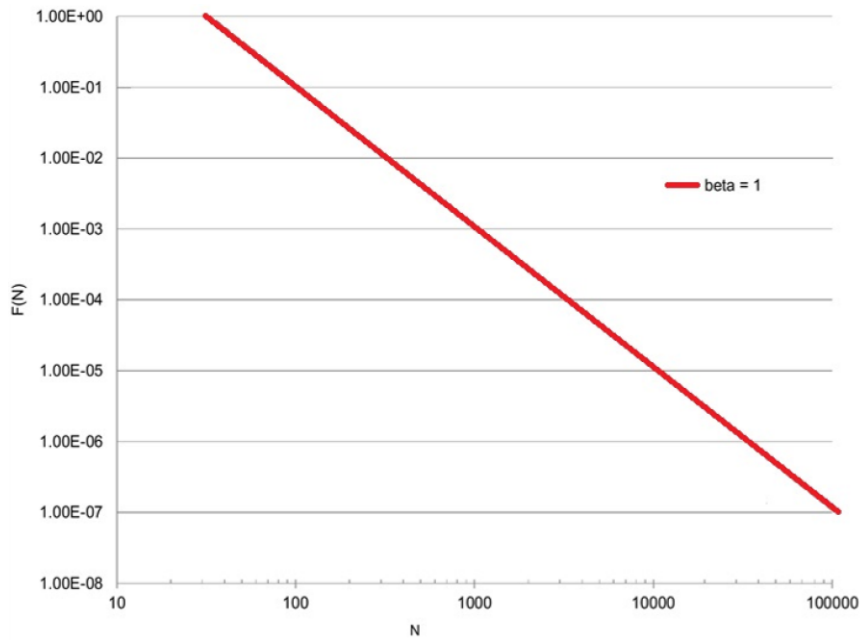
$P_{f\text{-vereist, GR}}$	= vereiste faalkans vanwege groepsrisico	[1/jaar]
β	= beleidsfactor	[-]
k	= risico-aversie index, met waarde 3 (Vrijling, 1985)	[-]
N	= aantal slachtoffers	[-]

Het groepsrisico volgens vergelijking (B7.1) is sterk risico-avers: bij een toename van het aantal slachtoffers met een factor 10 wordt vereist dat de kans op een dergelijke gebeurtenis met een factor 100 afneemt. Hiermee wordt tot uitdrukking gebracht dat de maatschappelijke impact van een overstroming met veel slachtoffers wezenlijk groter is dan de impact van meerdere kleinere overstromingen met weinig slachtoffers.

De waarde van de beleidsfactor β is afhankelijk van de mate van vrijwilligheid en het voordeel dat mensen genieten bij deelname aan de risicodragende activiteit. Voor de normering van de primaire waterkeringen is $\beta = 1$ aangehouden (Slootjes & Van der Most, 2016a, 2016b).

Bij de normering van de primaire waterkeringen bood de analyse van het groepsrisico (via een FN-curve, een grafiek waarin de overschrijdingskans F van het aantal dodelijke slachtoffers N wordt weergegeven) inzicht in dijktrajecten die het meest bijdragen aan het optreden van grote groepen slachtoffers (zogenaamde 'hot spots'). Voor die dijktrajecten is gekeken of aanscherping van de normering gewenst was (Slootjes & Van der Most, 2016a).

In Figuur B7.1 is de eis volgens het TAW-beoordelingskader (met $\beta = 1$ en $k = 3$) uitgezet binnen de assen van een FN-curve. Te zien is dat de eisen vanwege het groepsrisico pas significanter worden bij meer dan 1.000 slachtoffers.



Figuur B7.1: Eis volgens TAW-beoordelingskader (met $\beta = 1$ en $k = 3$)

Voor regionale waterkeringen ontbreekt het momenteel aan informatie om op landsniveau of op zijn minst op watersysteemniveau (zoals een boezemstelsel) invulling te kunnen geven aan de vereisten vanwege groepsrisico. Dat neemt niet weg dat is gekozen om indicatief ook het groepsrisico te betrekken als risicomaat bij de toepassing van de overstromingskansbenadering op de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Daarbij is de keuze van $\beta = 1$ overgenomen.

Om voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard de vereiste faalkansen vanwege groepsrisico te kunnen afleiden, is inzicht nodig in het aantal slachtoffers bij een overstroming. Hiervoor is een bovengrensbenadering gevolgd:

- Uitgegaan is van de in Tabel B3.1 gepresenteerde aantallen slachtoffers, die zijn gebaseerd op 2D-overstromingsberekeningen;
- Uitgegaan is dat er geen preventieve evacuatie plaatsvindt voorafgaand aan een overstroming;
- Uitgaan is van het maximale aantal slachtoffers van de beschikbare doorbraaklocaties in een ringdeel.

Aangehouden is dat doorbraken van ringdelen onafhankelijke gebeurtenissen zijn. Dit in lijn met Bijlage 10, waarin zal worden toegelicht dat onderlinge onafhankelijkheid tussen dijksecties als uitgangspunt is gehanteerd. Verder zijn, vanwege de kleine resulterende kansbijdragen, meervoudige doorbraken van ringdelen buiten beschouwing gelaten.

Tabel B7.1 bevat het op basis van deze uitgangspunten resulterende aantal slachtoffers per ringdeel.

Ringdeel	Dijksectie	Boezemsysteem	Slachtoffers N
1	5	Schermerboezem	8
2	7	Schermerboezem	39
3	11	Schermerboezem	36
4	12	Schermerboezem	32
5	13	VRNK-boezem	1
6	17	VRNK-boezem	0

Tabel B7.1: Aantal slachtoffers bij doorbraak regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard

Het aantal slachtoffers is vervolgens gerangschikt naar grootte, om een cumulatieve kansverdeling (ten behoeve van de FN curve) te kunnen maken. Het resultaat wordt weergegeven in Tabel B7.2.

Ringdeel	Dijksectie	Boezemsysteem	Slachtoffers N
5	13	VRNK-boezem	1
1	5	Schermerboezem	8
4	12	Schermerboezem	32
3	11	Schermerboezem	36
2	7	Schermerboezem	39

Tabel B7.2: Naar grootte geschikt aantal slachtoffers bij doorbraak regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard

In Tabel B7.3 wordt toegelicht op welke wijze de overschrijdingskans van slachtoffers is gekoppeld aan de faalkansen van de verschillende ringdelen.

Slachtoffers	Overschrijdingskans
0	$P_{f \text{ ringdeel } 5} + P_{f \text{ ringdeel } 1} + P_{f \text{ ringdeel } 4} + P_{f \text{ ringdeel } 3} + P_{f \text{ ringdeel } 2}$
1	$P_{f \text{ ringdeel } 1} + P_{f \text{ ringdeel } 4} + P_{f \text{ ringdeel } 3} + P_{f \text{ ringdeel } 2}$
8	$P_{f \text{ ringdeel } 4} + P_{f \text{ ringdeel } 3} + P_{f \text{ ringdeel } 2}$
32	$P_{f \text{ ringdeel } 3} + P_{f \text{ ringdeel } 2}$
36	$P_{f \text{ ringdeel } 2}$
39	0

Tabel B7.3: Relatie slachtoffers en faalkansen ringdelen

Door invullen van het aantal slachtoffers in vergelijking (B7.1), met $\beta = 1$ en $k = 3$, volgt, aan de hand van de in Tabel B7.3 toegelichte samenhang, de vereiste overstromingskans per ringdeel vanwege groepsrisico. Tabel B7.4 bevat het resultaat, waarbij kansen van vaker dan 1 maal per jaar zijn begrensd op 1 maal per jaar.

Ringdeel	Vereiste faalkans vanwege groepsrisico $P_{f\text{-vereist, GR}}$ [1/jaar]
1	1/1
2	1/1
3	1/8
4	1/4
5	1/1
6	n.v.t.

Tabel B7.4: Vereiste faalkans regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard vanwege groepsrisico (indicatief)

Bijlage 8: Overstromingskansbenadering: Resumé vereiste faalkans

Door combinatie van de in Tabel B4.4, Tabel B6.3 en Tabel B7.4 vermelde waarden, kunnen de vereiste faalkansen in samenhang worden bekeken. Tabel B8.1 bevat het resultaat van deze vergelijking. Hierbij is voor zowel het individueel risico als het groepsrisico uitgegaan van de situatie zonder preventieve evacuatie en is voor het economisch risico uitgegaan van de 'situatie 2050'.

Ringdeel	Lengte [m]	Vereiste faalkans vanwege individueel risico $P_{f\text{-vereist, LIR}}$ [1/jaar]	Vereiste faalkans vanwege economisch risico $P_{f\text{-vereist, KBA}}$ [1/jaar]	Vereiste faalkans vanwege groepsrisico (indicatief) $P_{f\text{-vereist, GR}}$ [1/jaar]
1	8.710	1/1.097	1/7.846	1/1
2	4.330	1/2.206	1/37.306	1/1
3	4.025	1/2.373	1/8.490	1/8
4	4.420	1/2.161	1/9.137	1/4
5	5.640	1/318	1/1.652	1/1
6	4.874	1/16	1/382	n.v.t.

Tabel B8.1: Vereiste faalkans regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard uitgesplitst naar risicomaat

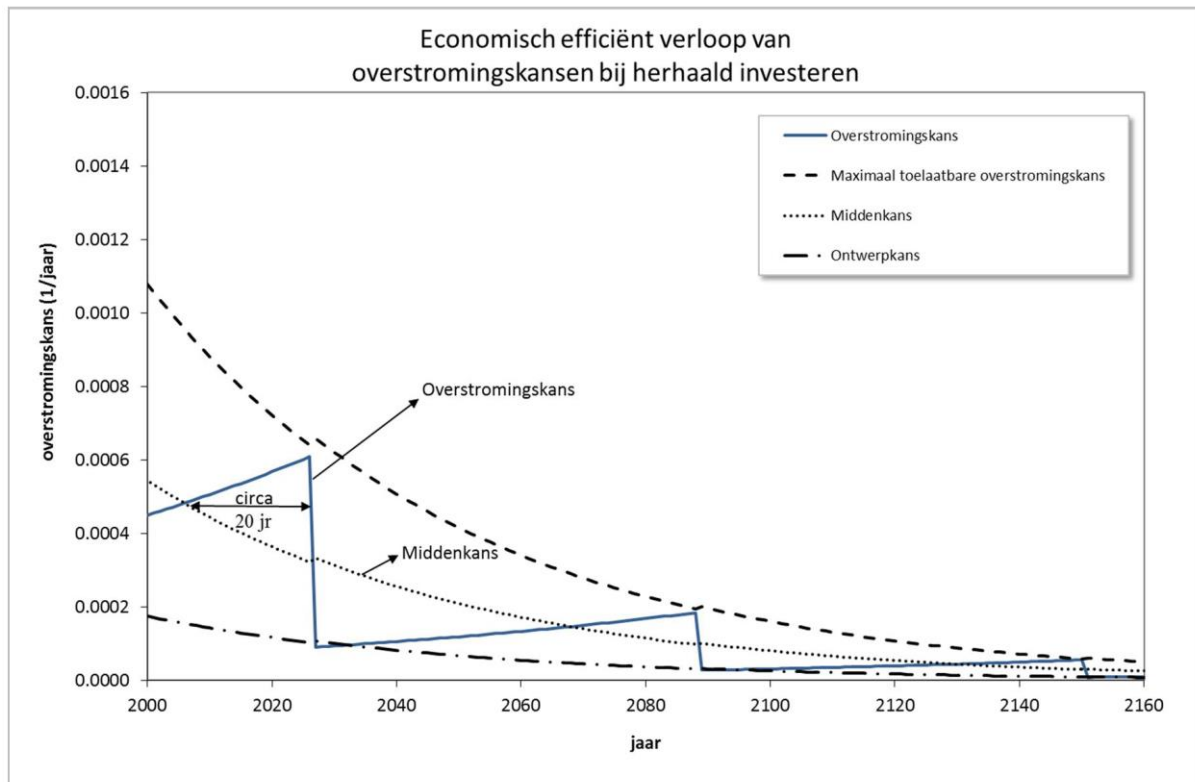
Uit Tabel B8.1 blijkt dat de eisen vanwege het economisch risico voor alle ringdelen maatgevend is. Dit hangt uiteraard samen met de in Bijlage 4 gemaakte keuze om ook voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard als LIR-eis van 10^{-5} per jaar te hanteren. Een strengere eis zou immers resulteren in strengere en mogelijk maatgevende vereiste faalkansen vanwege individueel risico. Dit zou voor enkele ringdelen bijvoorbeeld het geval zijn als een LIR-eis van 10^{-6} per jaar zou worden gehanteerd. Dit met het doel om, in combinatie met overstromingen vanuit het buitenwater, dicht aan te sluiten bij een overall LIR-eis van 10^{-5} per jaar.

Van oudsher is de gedachte dat slachtofferrisico's bij boezemkaden van ondergeschikt belang zijn. In lijn hiermee blijkt, bij de gehanteerde uitgangspunten, uit Tabel B8.1, dat de eisen vanwege slachtofferrisico's (individueel risico of groepsrisico) voor geen enkel ringdeel doorslaggevend zijn. Zelfs niet bij de voor de slachtofferrisico's gevolgde bovengrensbenaderingen.

Merk weer op dat Tabel B8.1 voor ieder ringdeel de vereiste faalkans weergeeft voor de totale lengte van dat ringdeel.

Bijlage 9: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans als signaleringswaarde, ondergrens en normklassen

Bij de normering van de primaire waterkeringen is uiteengezet (Eijgenraam, 2008, 2011), dat het investeren in waterveiligheid door het versterken van waterkeringen niet moet worden gezien als een eenmalige beslissing, maar als een terugkerende of periodieke beslissing.



Figuur B9.1: Zaagtandpatroon van overstromingskansen in de tijd

Figuur B9.1 toont (als streepjeslijn) het verloop in de tijd van de (economisch gezien) maximaal toelaatbare overstromingskans. Door economische groei en demografische ontwikkelingen neemt de maximaal toelaatbare overstromingskans in de loop van de tijd af: de eis wordt strenger. Als de aanwezige overstromingskans (de blauwe lijn in Figuur B9.1) is toegenomen tot de maximaal toelaatbare overstromingskans, dan is een maatregel nodig. De omvang van de maatregel (en daarmee ook de tijd tot de volgende maatregel) wordt sterk beïnvloed door de verhouding tussen de vaste en de variabele investeringskosten (zie ook Bijlage 5 en Bijlage 6). Als de vaste investeringskosten relatief groot zijn, dan is het economisch verstandig om de nieuwe maatregel lang uit te stellen. Dit vertaalt zich dan in een strenge eis voor de ontwerpkins. Figuur B9.1 toont (als streepstiplijn) ook het verloop in de tijd van de ontwerpkins. Met het uitvoeren van de maatregel neemt de overstromingskans een stuk af. Maar na enige tijd neemt de overstromingskans weer toe door klimaatverandering en bodemdaling: de cyclus herhaalt zich, zij het met strengere waarden voor de maximaal toelaatbare overstromingskans en de ontwerpkins. In Figuur B9.1 komt de herhaling van de cyclus tot uitdrukking in een zaagtandpatroon van de overstromingskansen.

In de praktijk is er de nodige tijd gemoeid tussen het moment waarop wordt besloten om een maatregel te gaan uitvoeren en het daadwerkelijk uitvoeren van deze maatregel. Als hiermee geen rekening wordt gehouden, dan wordt de maximaal toelaatbare overstromingskans in de tussentijd overschreden. Om dit te voorkomen is de middenkans (de stipjeslijn in Figuur B9.1) geïntroduceerd

(Eijgenraam, 2008). De middenkans vormt een geschikte indicator om te komen tot besluitvorming om een maatregel te gaan uitvoeren: op het moment dat de overstromingskans de middenkans overschrijdt, is er nog ongeveer twintig jaar tijd voordat de maximaal toelaatbare overstromingskans wordt overschreden. Er wordt in dit verband wel gesproken over de ‘besteltijd’.

Bij de normering van de primaire waterkeringen is het voorgaande vertaald door voor een dijktraject altijd twee waarden te specificeren (Wet van 2 november 2016; Kok et al., 2017):

1. Signaleringswaarde

Als bij de wettelijke beoordeling op veiligheid blijkt dat de aanwezige overstromingskans van een dijktraject groter is dan de voor dit dijktraject geldende signaleringswaarde, dan moet dit worden gemeld aan de minister van Infrastructuur en Milieu. De benodigde maatregelen komen dan mogelijk in aanmerking voor subsidie (Hoogwaterbeschermingsprogramma).

De signaleringswaarde is gelijkgesteld aan de middenkans voor het jaar 2050 (Slootjes & Van der Most, 2016a).

2. Ondergrens

De ondergrens is gelijk aan de maximaal toelaatbare overstromingskans. Als hieraan wordt voldaan, dan wordt in ieder geval voldaan aan de eisen vanwege het individueel risico.

Bij de normering van de primaire waterkeringen is gewerkt met normklassen, om berekende overstromingskansen te kunnen toedelen. De gehanteerde normklassen en de daarbij behorende intervallen is te zien in Tabel B9.1.

Normklasse [1/jaar]	Interval [1/jaar]
1/300	1/1 - 1/550
1/1.000	1/550 - 1/1.700
1/3.000	1/1.700 - 1/5.500
1/10.000	1/5.500 - 1/17.000
1/30.000	1/17.000 - 1/55.000
1/100.000	1/55.000 - 1/170.000

Tabel B9.1: Normklassen en intervallen voor de signaleringswaarde van dijktrajecten voor primaire waterkeringen (Slootjes & Van der Most, 2016a)

Op beleidsmatige gronden is bij de normering van de primaire waterkeringen gekozen om 1/300 per jaar als laagste normklasse te hanteren voor de signaleringswaarde. En verder is vanuit economisch perspectief gekozen om voor de ondergrens één normklasse soepeler te hanteren dan voor de signaleringswaarde (Slootjes & Van der Most, 2016a).

Omdat voor regionale waterkeringen een ontwerplevensduur wordt gehanteerd van 30 jaar (zie ook Bijlage 2), pakt een besteltijd van 20 jaar erg streng uit: afkeuren na 10 jaar. Er is dan ook aanleiding om te zoeken naar mogelijkheden om tot een optimalere getalsmatige invulling te komen van de signaleringswaarde. Vooralsnog is hieraan voorbijgegaan en is voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard aangesloten bij de werkwijze voor primaire waterkeringen. De voor primaire waterkeringen gehanteerde begrenzing van signaleringswaarde is echter achterwege gelaten. Na bewerking van de vereiste faalkans vanwege economisch risico in Tabel B8.1, resulteren de waarde zoals weergegeven in Tabel B9.2.

Ringdeel	Signaleringswaarde vereiste faalkans [1/jaar]	Ondergrens vereiste faalkans [1/jaar]
1	1/10.000	1/3.000
2	1/30.000	1/10.000
3	1/10.000	1/3.000
4	1/10.000	1/3.000
5	1/1.000	1/300
6	1/300	1/100

Tabel B9.2: Signaleringswaarden en ondergrenzen vereiste faalkansen voor regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard

Bijlage 10: Overstromingskansbenadering: Lengte-effect

Zoals toegelicht in Bijlage 1, heeft het toetsresultaat voor iedere onderscheiden dijksectie betrekking op een daarbinnen aanwezige doorsnede. Bij het omwerken van de toetsresultaten naar aanwezige faalkansen per ringdeel moet rekening worden gehouden met het lengte-effect. Over het algemeen neemt de aanwezige faalkans namelijk toe als de lengte van een dijkstrekking toeneemt.

In de basis vloeit het lengte-effect voort uit kennisonzekerheid: grond is een natuurlijk materiaal waarvan de sterkte-eigenschappen niet op elke plek bekend zijn. Als er op bepaalde locaties metingen van de schuifsterkte worden gedaan, dan is de schuifsterkte op die locaties bekend. Maar de schuifsterkte tussen de meetlocaties blijft echter onbekend. Door in de faalkansberekeningen uit te gaan van de laagst gemeten schuifsterkte zou de faalkans worden onderschat. In de strekkingen tussen de meetlocaties kan de aanwezige schuifsterkte immers lager zijn dan de laagst gemeten waarde. Hoewel onzeker is hoe zwak de zwakste plek is, kan er op basis van een statistische beschrijving van de ruimtelijke spreiding in de schuifsterkte wel een schatting worden gemaakt van de kans dat de minimaal aanwezige schuifsterkte een bepaalde waarde heeft (Projectbureau VNK2, 2011).

Bij het omwerken van de toetsresultaten naar aanwezige faalkansen per ringdeel moet er allereerst rekening mee worden gehouden dat de faalkans per dijksectie niet gelijk hoeft te zijn aan de faalkans per doorsnede. Een dijksectie (vaak ook aangeduid als dijkvak) is hierbij een deel van de dijk waarbinnen de belasting en de sterkte statistisch homogeen zijn: de kansverdelingen van de belasting en de sterkte zijn binnen de dijksectie overal hetzelfde. Toch is de schuifsterkte niet voor iedere doorsnede binnen een dijksectie gelijk: er zijn doorsneden die sterker zijn dan het gemiddelde van de dijksectie en doorsneden die zwakker zijn dan het gemiddelde van de dijksectie. Kortom, er is sprake van ruimtelijke spreiding in langrichting. Deze spreiding is groter als er sprake is van snelle fluctuaties, waarbij de sterkte-eigenschappen van locatie tot locatie wezenlijk verschillen. Dat is met name het geval voor geotechnische faalmechanismen zoals macrostabiliteit binnenwaarts. Door de ruimtelijke spreiding verschilt de faalkans van een dijksectie van de faalkans van een doorsnede: het **lengte-effect binnen een dijksectie**. De grootte van dit lengte-effect wordt uitgedrukt in de lengte-effectfactor N_{sectie} . Er geldt:

$$N_{\text{sectie}} = P_{f\text{-aanw, sectie}} / P_{f\text{-aanw, dsn}} \quad (\text{B10.1})$$

In de praktijk blijkt overigens dat de aanname van statistische homogeniteit vaak niet van toepassing is op een dijksectie. Om allerlei praktische redenen wordt namelijk bij de toetsing vaak een relatief ongunstige doorsnede gebruikt voor de doorsnedetoets, al dan niet in combinatie met een eveneens ongunstig ondergrondscenario. In Bijlage 1 is toegelicht dat dit ook het geval is geweest bij de toetsing van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. In aansluiting bij het assemblageprotocol voor primaire waterkeringen (Diermanse et al., 2016) is de waarde van de lengte-effectfactor N_{sectie} daarom berekend met:

$$N_{\text{sectie}} = 1 + a_l \cdot L_{\text{sectie}} / b_l \quad (\text{B10.2})$$

met:

N_{sectie}	= lengte-effectfactor voor een dijksectie	[-]
L_{sectie}	= lengte van de dijksectie	[m]
a_l	= mechanismegevoelige fractie van de dijksectielengte	[-]
b_l	= lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van de dijksectie	[m]

Voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts geldt (Van Duinen et al., 2016):

$$a_i = 0,033$$

$$b_i = 50 \text{ m}$$

Bij het omwerken van de toetsresultaten naar aanwezige faalkansen per ringdeel bestaat de volgende stap uit het combineren van de gevonden faalkansen per dijksectie tot de faalkans van het ringdeel waarvan de beschouwde dijksecties deel uitmaken. Het gaat daarmee om het berekenen van faalkansen van combinaties van dijksecties. Daarbij moet rekening worden gehouden met onderlinge afhankelijkheid van dijksecties. Deze onderlinge afhankelijkheid wordt voor een belangrijk deel bepaald door het feit dat hoge (extreme) belastingen voor deze dijksecties optreden tijdens dezelfde gebeurtenissen. Voor geotechnische toetsproeven, zoals macrostabiliteit binnenwaarts, is de onzekerheid in de belasting minder bepalend voor de faalkans van een dijksectie dan voor andere toetsproeven. De grootste onzekerheid bij macrostabiliteit binnenwaarts ligt immers in de sterkte. De aanname van onderlinge onafhankelijkheid tussen dijksecties is daarom functioneel om zo op relatief eenvoudige wijze een redelijke benadering van de gecombineerde faalkans van dijksecties in een ringdeel af te leiden (Lendering et al., 2015a, 2015b; Diermanse et al., 2016). Deze aanname van onderlinge onafhankelijkheid vertaalt zich in het **lengte-effect tussen dijksecties**. Rekentechnisch krijgt dit invulling door het ringdeel te schematiseren als een serie-systeem: het ringdeel faalt als minstens één van de inliggende dijksecties faalt:

$$P_{f\text{-aanw, ringdeel}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{f\text{-aanw, sectie-}i}) \quad (\text{B10.3})$$

met:

$$P_{f\text{-aanw, ringdeel}} = \text{aanwezige faalkans van het ringdeel} \quad [1/\text{jaar}]$$

$$P_{f\text{-aanw, sectie-}i} = \text{aanwezige faalkans van dijksectie } i \quad [1/\text{jaar}]$$

$$N = \text{aantal dijksecties binnen het ringdeel} \quad [-]$$

Bijlage 11: Overstromingskansbenadering: Vereiste faalkans volgens overschrijdingskansbenadering

Zoals gezien in paragraaf 3.3, Figuur 11, ligt ook aan de overschrijdingskansbenadering een risicobeschouwing ten grondslag. Alleen is in 1999, bij de introductie van de toetsnormen voor regionale waterkeringen, op beleidsmatige gronden gekozen om het vereiste beschermingsniveau niet te baseren op een beschouwing van risicomaten maar op het principe van 'geen trendbreuk'.

Figuur 11 maakt het mogelijk om inzichtelijk te maken wat de vereiste faalkansen zijn die voor de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard zijn verbonden aan de vigerende IPO-veiligheidsklassen.

Met behulp van Bijlage 10 zijn de vereiste faalkansen per doorsnede gecombineerd tot vereiste faalkansen per ringdeel ('verwerken lengte-effect'). Het resultaat is opgenomen in Tabel B11.1.

Ringdeel	Dijksectie	IPO-veiligheidsklasse	Vereiste overschrijdingskans doorsnede $N_{\text{vereist, dsn}}$	Vereiste IPO-faalkans doorsnede, gecombineerde faalmechanismen $P_{\text{vereist-IPO, dsn, combi}}$	Vereiste IPO-faalkans doorsnede, stabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist-IPO, dsn, stab bin}}$	Lengte dijkssectie L_{sectie}	Lengte-effectfactor stabiliteit binnenwaarts $N_{\text{sectie, stab bin}}$	Vereiste IPO-faalkans dijkssectie, stabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist-IPO, sectie, stab bin}}$	Vereiste IPO-faalkans ringdeel, stabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist-IPO, ringdeel, stab bin}}$
		[-]	[1/jaar]	[1/jaar]	[1/jaar]	[m]	[-]	[1/jaar]	[1/jaar]
1	1	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	1.520	2,0	1/3.120	1/532
	2	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	465	1,3	1/4.782	
	3	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	1.345	1,9	1/3.311	
	4	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	1.485	2,0	1/3.156	
	5	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	2.105	2,4	1/2.616	
	6	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	1.790	2,2	1/2.865	
2	7	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	3.175	3,1	1/2.019	1/912
	8	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	200	1,1	1/5.521	
	9	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	920	1,6	1/3.889	
	9a	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	35	1,0	1/6.109	
3	10	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	1.500	2,0	1/3.141	1/1.342
	11	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	2.525	2,7	1/2.344	
4	12	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	4.420	3,9	1/1.596	1/1.596
5	13	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	3.700	3,4	1/1.816	1/930
	14	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	730	1,5	1/4.218	
	15	V	1/1.000	1/5.000	1/6.250	1.210	1,8	1/3.475	
6	16	I	1/10	1/50	1/63	1.554	2,0	1/31	1/12
	17	I	1/10	1/50	1/63	3.320	3,2	1/20	

Tabel B11.1: Vereiste faalkans regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard volgens overschrijdingskansbenadering

Uit Tabel B11.1 blijkt dat, ondanks het gegeven dat de vigerende veiligheidsnorm voor de eerste 15 dijkssecties gelijk is, het lengte-effect toch leidt tot verschillen in vereiste faalkans op het niveau van ringdelen.

Bijlage 12: Overstromingskansbenadering: Aanwezige faalkans voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij semi-probabilistische rekenaanpak

Door gebruik te maken van de combinatie van vergelijking (B6.1) en (B6.2) is het mogelijk om de bij de toetsing op veiligheid per doorsnede gevonden stabiliteitsfactor (zie Tabel B1.2) om te rekenen naar de aanwezige faalkans. Met behulp van Bijlage 10 zijn de per doorsnede aanwezige faalkansen vervolgens gecombineerd tot aanwezige faalkansen per ringdeel ('verwerken lengte-effect'). Het resultaat van de omrekening is opgenomen in Tabel B12.1.

Ringdeel	Dijksectie	Aanwezige stabiliteitsfactor doorsnede $SF_{aanw, ds}$	Aanwezige schade-factor doorsnede (bij schematiseringsfactor $\gamma_s = 1,05$) $Y_{aanw, ds}$	Aanwezige betrouwbaarheids-index doorsnede $\beta_{aanw, ds, stab, bin}$	Aanwezige faalkans doorsnede, stabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch $P_{aanw, ds, stab, bin, semi prob}$ [1/jaar]	Lengte dijksectie L_{sectie} [m]	Lengte-effectfactor stabiliteit binnenwaarts $N_{sectie, stab, bin}$	Aanwezige faalkans dijksectie, stabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch $P_{aanw, sectie, stab, bin, semi prob}$ [1/jaar]	Aanwezige faalkans ringdeel, stabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch $P_{aanw, ringdeel, stab, bin, semi prob}$ [1/jaar]
1	1	voldoet o.b.v. restbreedte							1/23
	2	2,37	2,26	11,30	< 1/1.000.000	465	1,3	< 1/1.000.000	
	3	1,20	1,14	4,35	1/147.871	1.345	1,9	1/78.334	
	4	0,83	0,79	2,15	1/64	1.485	2,0	1/32	
	5	0,90	0,86	2,57	1/196	2.105	2,4	1/82	
	6	1,01	0,96	3,22	1/1573	1.790	2,2	1/721	
2	7	0,74	0,70	1,62	1/19	3.175	3,1	1/6	1/6
	8	0,90	0,86	2,57	1/196	200	1,1	1/173	
	9	1,16	1,10	4,11	1/51.369	920	1,6	1/31.962	
3	10	1,26	1,20	4,71	1/799.491	1.500	2,0	1/401.754	1/6
	11	0,72	0,69	1,50	1/15	2.525	2,7	1/6	
4	12	2,41	2,30	11,54	< 1/1.000.000	4.420	3,9	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000
5	13	1,08	1,03	3,64	1/7.287	3.700	3,4	1/2.117	1/2.086
	14	voldoet o.b.v. geometrische toets							
	15	1,22	1,16	4,47	1/256.032	1.210	1,8	1/142.351	
6	16	voldoet o.b.v. geometrische toets							1/2.283
	17	1,08	1,03	3,64	1/7.287	3.320	3,2	1/2.283	

Tabel B12.1: Aanwezige faalkansen regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, bij semi-probabilistische rekenaanpak

Tabel B12.1 laat zien dat de aanwezige faalkans van een ringdeel steeds vrijwel gelijk is aan de aanwezige faalkans van de zwakste dijksectie binnen dit ringdeel. En ook blijkt, door de beperkte lengten van de onderscheiden dijksecties, dat het lengte-effect binnen een dijksectie veelal beperkt van omvang blijft.

Bijlage 13: Overstromingskansbenadering: Toetsoordelen faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Door combinatie van Tabel 5 en Tabel 10 ontstaat het overzicht van vereiste en aanwezige faalkansen zoals weergegeven in Tabel B13.1.

Ringdeel	Vereiste faalkans, signaleringswaarde macrostabiliteit binnenwaarts $P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, signalering}}$ [1/jaar]	Vereiste faalkans, ondergrens macrostabiliteit binnenwaarts $P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, ondergrens}}$ [1/jaar]	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts $P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}}$ [1/jaar]
1	1/12.500	1/3.750	1/2.250
2	1/37.500	1/12.500	1/1.429
3	1/12.500	1/3.750	1/1.100
4	1/12.500	1/3.750	< 1/1.000.000
5	1/1.250	1/375	1/2.086
6	1/375	1/125	1/2.283

Tabel B13.1: Vereiste en aanwezige faalkansen regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Voor het toekennen van categorieën van toetsoordelen wordt aangesloten bij de werkwijze voor primaire waterkeringen (Diermanse et al., 2016). Voor de verschillende categorieën gelden de begrenzingswaarden zoals weergegeven in Tabel B13.2.

Categorie	Aanduiding categorie	Begrenzingswaarde categorie
I _t	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde	$P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}} < 1/30 \cdot P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, signalering}}$
II _t	Voldoet aan de signaleringswaarde	$1/30 \cdot P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, signalering}} < P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}} < P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, signalering}}$
III _t	Voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde	$P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, signalering}} < P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}} < P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, ondergrens}}$
IV _t	Voldoet mogelijk aan de ondergrens	$P_{f\text{-vereist, ringdeel, stab.bin, ondergrens}} < P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}} < P_{f\text{-vereist, ringdeel, ondergrens}}$
V _t	Voldoet niet aan de ondergrens	$P_{f\text{-vereist, ringdeel, ondergrens}} < P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}} < 30 \cdot P_{f\text{-vereist, ringdeel, ondergrens}}$
VI _t	Voldoet ruim niet aan de ondergrens	$P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}} > 30 \cdot P_{f\text{-vereist, ringdeel, ondergrens}}$

Tabel B13.2: Begrenzingswaarde categorieën van toetsoordelen voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Door combinatie van Tabel B13.1 en Tabel B13.2 volgen de toetsoordelen voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. Deze zijn opgenomen in Tabel B13.3.

Ringdeel	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts	Omschrijving
1	V _t	Voldoet niet aan de ondergrens
2	V _t	Voldoet niet aan de ondergrens
3	V _t	Voldoet niet aan de ondergrens
4	I _t	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde
5	II _t	Voldoet aan de signaleringswaarde
6	II _t	Voldoet aan de signaleringswaarde

Tabel B13.3: Toetsoordelen regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Bijlage 14: Overstromingskansbenadering: Kadeverbetering als maatregel

Zoals toegelicht in paragraaf 3.5, zijn voor dijksectie 4, 5 en 6 (ringdeel 1), voor dijksectie 8 en 9a (ringdeel 2) en voor dijksectie 11 (ringdeel 3) kadeverbeteringen uitgevoerd. Voor dijksectie 7 (ringdeel 2) is de planvorming al gereed maar is de kadeverbetering nog niet uitgevoerd. Al deze kadeverbeteringen waren gericht op het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts.

In de voorliggende bijlage wordt in beeld gebracht hoe de bovengenoemde kadeverbeteringen doorwerken in de faalkans voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. Daarbij richt de uitwerking zich op de ringdelen 1 en 2, omdat hierover de meest gedetailleerde informatie beschikbaar is.

Door gebruik te maken van de combinatie van vergelijking (B6.1) en (B6.2) is het mogelijk om van iedere doorsnede de stabiliteitsfactor na kadeverbetering met een semi-probabilistische rekenaanpak om te rekenen naar de bijbehorende aanwezige faalkans. Per dijksectie is daarbij steeds uitgegaan van het dijksectiedeel in Tabel B2.1 met de laagste stabiliteitsfactor na kadeverbetering. Voor de dijksecties binnen een ringdeel waarvoor geen kadeverbetering noodzakelijk was (de dijksecties 1, 2, 3 en 9), is op een vergelijkbare wijze gebruik gemaakt van de in Tabel B1.2 vermelde stabiliteitsfactoren.

Vervolgens zijn, met behulp van Bijlage 10, de per doorsnede afgeleide aanwezige faalkansen gecombineerd tot aanwezige faalkansen per ringdeel ('verwerken lengte-effect').

Het resultaat van de analyse is opgenomen in Tabel B14.1.

Ringdeel	Dijksectie	Aanwezige stabiliteitsfactor doorsnede na verbeteren $SF_{aanw, dir, na}$	Aanwezige schadefactor doorsnede na verbeteren (bij schematiseringsfactor $\gamma_{s, na} = 1,05$) $Y_{s, aanw, dir, na}$	Aanwezige betrouwbaarheidsindex doorsnede stabiliteit binnenwaarts na verbeteren $\beta_{aanw, dir, stab, bin, na}$	Aanwezige faalkans doorsnede, stabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch na verbeteren $P_{aanw, dir, stab, bin, semi-prob, na}$ [1/jaar]	Lengte dijksectie $L_{dijksectie}$	Lengte-effectfactor stabiliteit binnenwaarts $N_{aanw, stab, bin}$	Aanwezige faalkans dijksectie, stabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch na verbeteren $P_{aanw, sectie, stab, bin, semi-prob, na}$ [1/jaar]	Aanwezige faalkans ringdeel, stabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch na verbeteren $P_{aanw, ringdeel, stab, bin, semi-prob, na}$ [1/jaar]
1	1	voldoet o.b.v. restbreedte	-	-	-	-	-	-	1/2.260
	2	2,37	2,26	11,30	< 1/1.000.000	465	1,3	< 1/1.000.000	
	3	1,20	1,14	4,35	1/147.871	1.345	1,9	1/78.334	
	4	1,11	1,06	3,82	1/14.780	1.485	2,0	1/7.464	
	5	1,10	1,05	3,76	1/11.637	2.105	2,4	1/4.870	
	6	1,13	1,08	3,94	1/24.082	1.790	2,2	1/11.040	
2	7	1,10	1,05	3,76	1/11.637	3.175	3,1	1/3.759	1/2.675
	8	1,11	1,06	3,82	1/14.780	200	1,1	1/13.056	
	9	1,16	1,10	4,11	1/51.369	920	1,6	1/31.962	

Tabel B14.1: Aanwezige faalkansen na kadeverbetering regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, bij semi-probabilistische rekenaanpak

Door vergelijking van Tabel B14.1 met Tabel B12.1 blijkt dat de faalkans door de kadeverbetering is verbeterd met een factor 98 (ringdeel 1) en een factor 446 (ringdeel 2).

Door vergelijking van Tabel B14.1 met Tabel B11.1 blijkt dat met de kadeverbetering ruim wordt voldaan aan de faalkans die is vereist om te voldoen aan het beschermingsniveau dat hoort bij de vigerende overschrijdingskansbenadering.

Als na de kadeverbetering op basis van de semi-probabilistische rekenaanpak een hertoetsing zou worden uitgevoerd, dan resulteren voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts de toetsoordelen zoals weergegeven in Tabel B14.2.

Ringdeel	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts semi-probabilistisch na verbeteren
1	V_t
2	V_t

Tabel B14.2: Toetsoordelen ringdeel 1 en 2 na kadeverbetering voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij semi-probabilistische rekenaanpak

Door vergelijking van Tabel B14.2 met Tabel B13.3 blijkt dat er, op grond van uitsluitend een semi-probabilistische rekenaanpak, niet direct kan worden geconcludeerd dat de kadeverbetering leidt tot een verbetering van de toetsoordelen. Om de verbetering van de toetsoordelen onweerlegbaar aan te tonen is in principe het nodig om aanvullend de probabilistische rekenaanpak toe te passen.

Ook zonder zo'n aanvullende probabilistische rekenaanpak is het echter mogelijk om een onderbouwde inschatting te maken van het effect van de kadeverbetering.

In Tabel B13.1 staan voor ringdeel 1 en 2 de aanwezige faalkansen vermeld voor de bestaande situatie. Zoals blijkt uit Tabel 10, zijn deze aanwezige faalkansen gebaseerd op een probabilistische rekenaanpak.

Als de bij de semi-probabilistische rekenaanpak gevonden verbeterfactoren worden gecombineerd met de aanwezige faalkansen zoals vermeld in Tabel B13.1, dan is het mogelijk om, zonder een aanvullende probabilistische analyse, de aanwezige faalkans na kadeverbetering te bepalen. Dit wordt weergegeven in Tabel B14.3.

Ringdeel	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts bestaande situatie $P_{F\text{-aanw, ringdeel, stab.bin, voor}}$ [1/jaar]	Verbeterfactor kadeverbetering	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts na kadeverbetering $P_{F\text{-aanw, ringdeel, stab.bin, na}}$ [1/jaar]
1	1/2.250	98	1/220.500
2	1/1.429	446	1/637.334

Tabel B14.3: Aanwezige faalkansen ringdeel 1 en 2 na kadeverbetering voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Na een hertoetsing resulteren dan, na kadeverbetering, voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts de toetsoordelen zoals weergegeven in Tabel B14.4.

Ringdeel	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts na verbeteren
1	II_t
2	II_t

Tabel B14.4: Toetsoordelen ringdeel 1 en 2 na kadeverbetering voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts

Uit Tabel B14.4 blijkt, dat de kadeverbetering ertoe leidt dat de ringdelen 1 en 2 voldoen aan de signaleringswaarde en dus ook aan de ondergrens.

Bijlage 15: Overstromingskansbenadering: Beperken verkeersbelasting als maatregel

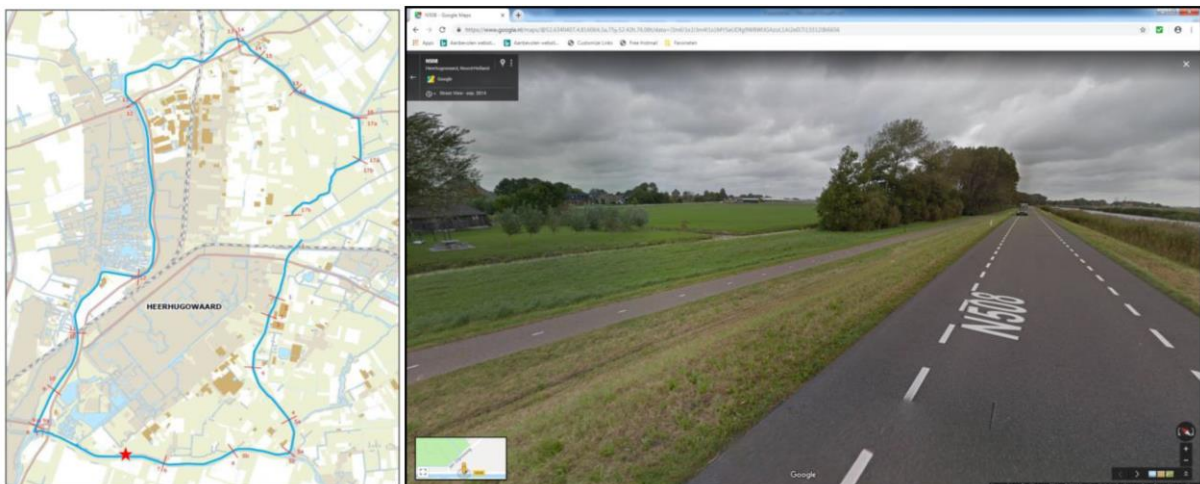
In Bijlage 14 is gekeken naar kadeverbetering als maatregel om de regionale waterkeringen te laten voldoen aan de in Tabel 5 vermelde vereiste faalkansen voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. Echter, in 2015 is bij probabilistische analyses gebleken dat de aanwezige faalkans soms zeer gevoelig is voor het wel of niet in de analyse meenemen van de invloed van verkeersbelasting. In de voorliggende bijlage wordt daarom verkend in hoeverre het mogelijk is om de veiligheidsopgave te verkleinen door het nemen van een beheermaatregel: het onder maatgevende omstandigheden weren van verkeer op de regionale waterkering. Dit krijgt invulling voor ringdeel 2 (zie voor de ligging Figuur 20) van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Voor dit ringdeel is namelijk een aansprekende analyse beschikbaar.

Zoals toegelicht in Bijlage 1, is door Hollands Noorderkwartier bij de toetsing op veiligheid voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts gerekend met een bovenbelasting van 13 kN/m² over een breedte van 2,50 m voor secties waar sprake is van een wegverharding. En voor secties waar sprake is van een groene kade, ontoegankelijk voor zwaar verkeer, is gerekend met een bovenbelasting van 5 kN/m² over een breedte van 2,50 m.

Ringdeel 2 bestaat uit de Huygendijk en uit een gedeelte van de Huygendijk N508. Voor de ligging van deze waterkeringen wordt verwezen naar Figuur 2. In paragraaf 2.5 is over deze waterkeringen toegelicht:

- De **Huygendijk** heeft een kruinbreedte die varieert van 2,5 m tot 4,5 m. In een deel van het tracé bevindt zich op de kruin een asfaltweg, in een ander deel bevindt de asfaltweg zich op een binnenberm en nog een ander deel bestaat uit een groene kade.
- De **Huygendijk N508** heeft een kruinbreedte die varieert van 7,5 m tot 8,5 m. Op de kruin bevindt zich een asfaltweg.

De N508 is een provinciale weg. In Figuur B15.1 wordt hiervan een beeld gegeven, overgenomen van Figuur 7.



Figuur B15.1: Beeld van de Huygendijk N508 (<https://www.google.nl/maps/>)

Zoals toegelicht in paragraaf 4.4, is bij de probabilistische analyse op doorsnedeniveau die in 2015 is uitgevoerd voor polder Heerhugowaard, rekening gehouden met onzekerheid over de boezemwaterstand tegen de regionale waterkeringen in relatie tot het afkondigen van een maalstop, onzekerheid over de grootte van de verkeersbelasting op de regionale waterkeringen en onzekerheid

over de ligging van de freatische lijn in de regionale waterkeringen (Lendering et al., 2015a). Voor ringdeel 2 is het resultaat van de probabilistische rekenaanpak opgenomen in Tabel 8. Ook zijn in 2015 berekeningen gemaakt voor de situatie zonder verkeersbelasting (Lendering et al., 2015a). Het resultaat van beide analyse wordt weergegeven in Tabel B15.1.

Ringdeel	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts probabilistisch met verkeersbelasting $P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin verkeersbelasting}}$ [1/jaar]	Aanwezige faalkans macrostabiliteit binnenwaarts probabilistisch zonder verkeersbelasting $P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin geen verkeersbelasting}}$ [1/jaar]
2	1/1.429	< 1/100.000

Tabel B15.1: Aanwezige faalkans voor ringdeel 2 voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij probabilistische rekenaanpak, met en zonder aanwezigheid verkeersbelasting (Lendering et al., 2015a, 2015b)

Uit Tabel B15.1 komt de grote gevoeligheid naar voren van de aanwezige faalkans van ringdeel 2 voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts in relatie tot het wel of niet aanwezig zijn van verkeersbelasting. Dit betekent dat het zinvol is om te verkennen of het mogelijk is om onder maatgevende omstandigheden verkeer van deze regionale waterkering te weren. Omdat er sprake is van een provinciale weg is het niet vanzelfsprekend dat verkeersmaatregelen succesvol zullen zijn; **het falen van de verkeersmaatregelen moet daarom in de beschouwing worden betrokken. Dat kan via (Lendering et al., 2015a):**

$$P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}} = P_{\text{verkeersmaatregelen}} \cdot P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin|verkeersbelasting}} + (1 - P_{\text{verkeersmaatregelen}}) \cdot P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin|geen verkeersbelasting}} \quad (\text{B15.1})$$

met:

$P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin}}$	= aanwezige faalkans ringdeel voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts	[1/jaar]
$P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin verkeersbelasting}}$	= aanwezige faalkans ringdeel voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij aanwezigheid van verkeersbelasting	[1/jaar]
$P_{f\text{-aanw, ringdeel, stab.bin geen verkeersbelasting}}$	= aanwezige faalkans ringdeel voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij afwezigheid van verkeersbelasting	[1/jaar]
$P_{\text{verkeersmaatregelen}}$	= faalkans van verkeersmaatregelen	[-]

In Tabel B15.2 wordt voor een set aan waarden voor de faalkans van de verkeersmaatregelen, de resulterende aanwezige faalkans van ringdeel 2 gepresenteerd voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts.

Faalkans verkeersmaatregelen $P_{\text{verkeersmaatregelen}}$ [-]	Aanwezige faalkans ringdeel 2 macrostabiliteit binnenwaarts probabilistisch $P_{\text{F-aanw, ringdeel, stab.bin}}$ [1/jaar]
1/2	< 1/2.818
1/4	< 1/5.481
1/10	< 1/12.662
1/50	< 1/42.024

Tabel B15.2: Resulterende aanwezige faalkans voor ringdeel 2 voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts bij probabilistische rekenaanpak, in relatie tot faalkans verkeersmaatregelen

Op de wijze zoals beschreven in Bijlage 13, kan nu voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts een hertoetsing worden uitgevoerd voor verkeersmaatregelen als beheermaatregel en voor de wijze waarop dit doorwerkt in de toetsoordelen voor ringdeel 2. De resulterende toetsoordelen staan in Tabel B15.3.

Faalkans verkeersmaatregelen $P_{\text{verkeersmaatregelen}}$ [-]	Toetsoordeel ringdeel 2 macrostabiliteit binnenwaarts bij verkeersmaatregelen
1/2	V _t
1/4	V _t
1/10	III _t
1/50	II _t

Tabel B15.3: Toetsoordelen ringdeel 2 voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, in relatie tot faalkans verkeersmaatregelen

Tabel B15.3 laat zien dat het nemen van verkeersmaatregelen kan leiden tot een beperking van de veiligheidsopgave of zelfs tot het verdwijnen hiervan.

Vanwege het positieve effect, wordt een vervolganalyse zinvol geacht. Vervolgstappen hierbij zijn:

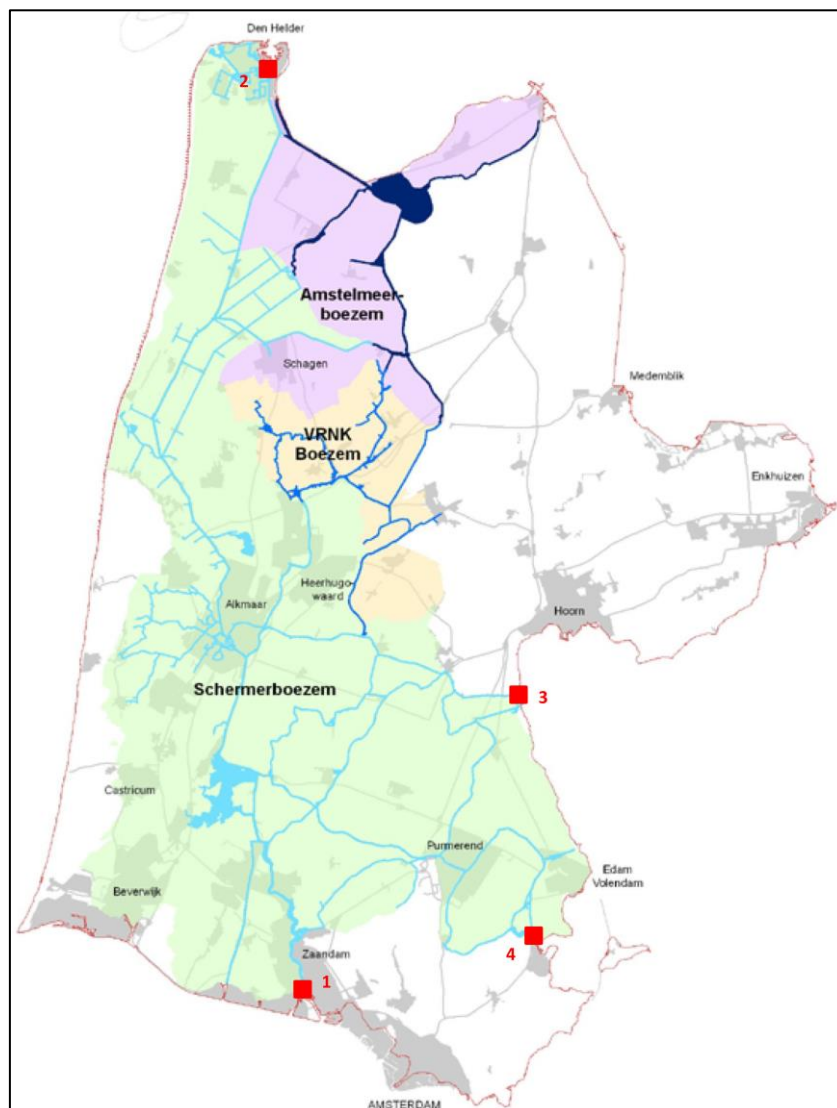
- In overleg treden met de wegbeheerder, de provincie Noord-Holland, met het doel om te komen tot afspraken over de omstandigheden waaronder het verkeer van de regionale waterkering zal worden geweerd;
- Maken van een draaiboek voor de stappen die nodig zijn om daadwerkelijk invulling te kunnen geven aan het weren van verkeer;
- Uitvoeren van een faalkansanalyse om te komen tot een betere onderbouwing van de faalkans van verkeersmaatregelen;
- Uiteindelijk: trainen van beide organisaties en oefenen met het daadwerkelijk nemen van verkeersmaatregelen.

Na inventarisatie van de aan verkeersmaatregelen verbonden kosten en baten, kan een vergelijking worden gemaakt met de kosten en baten van kadeverbetering en kan onderbouwd worden gekozen voor de maatregel die het meest doelmatig (kosteneffectief) is.

Bijlage 16: Overstromingskansbenadering: Inzet van extra gemaalcapaciteit als maatregel

In de tot nu toe gepresenteerde analyses is uitgegaan van het regionale watersysteem zoals dat in 2011 en 2015 aanwezig was en zoals dat als zodanig door Hollands Noorderkwartier bij de toetsing op veiligheid is betrokken. Maar in 2017 zijn er veranderingen in dit systeem aangebracht. Onder andere voor wat betreft de aanwezige gemaalcapaciteit. In de voorliggende bijlage wordt verkend hoe deze veranderingen bij de veiligheidsanalyse van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard kunnen worden betrokken.

Figuur B16.1 laat zien dat er binnen het beheergebied van Hollands Noorderkwartier meerdere boezemstelsels aanwezig zijn.



Figuur B16.1: Boezemstelsels Hollands Noorderkwartier, met locatie boezemgemalen Schermerboezem

In de voorliggende bijlage richt de aandacht zich specifiek op de Schermerboezem. Voor het peilbeheer van de Schermerboezem spelen al sinds jaar en dag twee boezemgemalen een cruciale rol. Dit zijn het Zaangemaal bij Zaandam (met nummer 1 aangeduid in Figuur B16.1), dat in 1967 in gebruik is genomen en waarmee water van de Schermerboezem kan worden geloosd op het

Noordzeekanaal, en gemaal De Helsdeur in Den Helder (met nummer 2 aangeduid in Figuur B16.1), dat in 1973 in gebruik is genomen en waarmee water van de Schermerboezem kan worden geloosd op de Waddenzee. Het Zaangemaal heeft een capaciteit van 2.400 m³/minuut en De Helsdeur van 3.600 m³/minuut; gezamenlijk dus 6.000 m³/minuut.

Sinds 2017 is er extra gemaalcapaciteit beschikbaar gekomen. Toen is Gemaal C. Mantel in Schardam (met nummer 3 aangeduid in Figuur B16.1) in gebruik genomen, waarmee water van de Schermerboezem kan worden geloosd op het Markermeer. Gemaal C. Mantel heeft een capaciteit van 2.000 m³/minuut. Verder is momenteel Gemaal Monnickendam (met nummer 4 aangeduid in Figuur B16.1) in aanbouw, waarmee ook water van de Schermerboezem kan worden geloosd op het Markermeer. De verwachte ingebruikname van dit gemaal is eind 2022. Gemaal Monnickendam krijgt een capaciteit van 1.200 m³/minuut. Met de beide nieuwe gemalen is dus straks gezamenlijk een extra capaciteit van 3.200 m³/minuut beschikbaar. Kortom, vergeleken met de situatie van vóór 2017 zal de gemaalcapaciteit eind 2022 met meer dan 50% zijn toegenomen. Dat zal naar verwachting een gunstige uitwerking hebben op de peilbeheersing van de Schermerboezem.

In de voorliggende bijlage wordt verkend of de inzet van extra gemaalcapaciteit en de resulterende verbetering van de peilbeheersing van de Schermerboezem, kan worden vertaald in een beperking van de veiligheidsopgave van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Dit krijgt invulling voor ringdeel 2 en 3 (zie voor de ligging Figuur 20). Voor deze ringdelen is namelijk een veiligheidsopgave afgeleid (zie Tabel 11) én deze ringdelen bieden direct bescherming tegen de Schermerboezem.

Bij de verkenning zijn twee situaties in aanmerking genomen: een zonder en een met compartimentering van de Schermerboezem. Het compartimenteren krijgt vorm door het sluiten van een front bestaande uit vier boezemcompartimenteringswerken, waarop in Bijlage 17 verder wordt ingegaan. Door de compartimentering ontstaan de Schermerboezem Hoog (donkerblauw gekleurd in Figuur B17.1) en de Schermerboezem Laag (lichtblauw gekleurd in Figuur B17.1).

Intermezzo: kostenverdeling nieuwe boezemgemalen

Door Hollands Noorderkwartier is voor de Schermerboezem-Laag een lagere maatgevende waterstand afgeleid: NAP – 0,2 m (zie Figuur B17.1). De verwachting is dat hierdoor bij de toetsronde 2024 (op basis van de vigerende overschrijdingskansbenadering) meer boezemkaden in dit gebied kunnen worden goedgekeurd waardoor er minder kaderverbeteringen nodig zullen zijn. Vanuit deze gedachte is aan de financiering van de twee nieuwe boezemgemalen bijgedragen vanuit het Programma Verbetering Boezemkades van Hollands Noorderkwartier. Daarmee zijn de kosten van de gemalen al verdisconteerd en richt de verkenning in de voorliggende bijlage zich op de baten. Die zijn naar verwachting namelijk groter dan uitsluitend voor de Schermerboezem-Laag.

Zonder compartimentering van de Schermerboezem is voor ringdeel 2 en 3 de inzet van al de vier in Figuur 16.1 aangeduide boezemgemalen relevant. Met compartimentering van de Schermerboezem is voor ringdeel 2 en 3 het peilbeheer in de Schermerboezem Hoog relevant. De Schermerboezem Hoog wordt bemalen door gemaal De Helsdeur bij Den Helder en het Zaangemaal bij Zaandam. Door het compartimenteren neemt de te bemalen wateroppervlakte voor deze twee gemalen af van 19.568.104 m² (gehele Schermerboezem) naar 15.453.214 m² (Schermerboezem Hoog) (N. Postma, persoonlijke communicatie, 3 februari 2020); een afname met zo'n 21%.

Door Hollands Noorderkwartier zijn met het waterbewegingsmodel SOBEK voor de gehele Schermerboezem berekeningen gemaakt van de na extreme neerslag te verwachten boezemwaterstand op locaties met een tussenafstand van ongeveer 1 km, bij diverse omstandigheden:

- Zonder en met boezemcompartimentering;
- Alle boezemgemalen op volle capaciteit: zonder uitval, met uitval van een enkel boezemgemaal en met uitval van alle boezemgemalen;
- Zonder wind en met wind (met terugkeertijd 10 jaar), uit vier verschillende windrichtingen.

De berekeningsresultaten zijn beschikbaar gesteld voor de gebiedspilot (J.W. Evers, persoonlijke communicatie, 10 maart 2020). De resultaten zijn voor ringdeel 2 en 3 geanalyseerd, waarbij de volgende zaken naar voren kwamen:

- Ringdeel 2:
 - Zonder boezemcompartimentering:
 - Als alle boezemgemalen op maximale capaciteit draaien en het waait niet, dan bedraagt de boezemwaterstand NAP - 0,26 m. De variatie van de boezemwaterstand door wind kan 0,07 m bedragen. Afhankelijk van de windrichting leidt de wind tot een verhoging of tot een verlaging van de boezemwaterstand. De ongunstige windrichtingen zijn zuid en voor het oostelijke deel van ringdeel 2 ook west;
 - Uitval van gemaal De Helsdeur pakt het ongunstigst uit. Dit leidt tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,08 m;
 - Als alle boezemgemalen uitvallen, dan leidt dit tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,28 m. In dat geval is er grote kans op overschrijding van het maalstoppeil, met name als het waait uit een ongunstige richting.
 - Met boezemcompartimentering:
 - Als alle boezemgemalen op maximale capaciteit draaien, dan blijft de invloed van compartimentering op de boezemwaterstand verwaarloosbaar klein. Wel kan de variatie van de boezemwaterstand door wind toenemen tot 0,12 m. De ongunstige invloed van windrichting west neemt toe;
 - Uitval van gemaal De Helsdeur pakt het ongunstigst uit. Dit leidt tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,14 m;
 - Als alle boezemgemalen uitvallen, dan leidt dit tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,28 m. In dat geval is er grote kans op overschrijding van het maalstoppeil, met name als het waait uit een ongunstige richting.
- Ringdeel 3:
 - Zonder boezemcompartimentering:
 - Als alle boezemgemalen op maximale capaciteit draaien en het waait niet, dan bedraagt de boezemwaterstand NAP - 0,26 m. De variatie van de boezemwaterstand door wind kan 0,13 m bedragen. Afhankelijk van de windrichting leidt de wind tot een verhoging of tot een verlaging van de boezemwaterstand. De ongunstigste windrichting is zuid;
 - Uitval van gemaal De Helsdeur pakt het ongunstigst uit. Dit leidt tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,06 m;
 - Als alle boezemgemalen uitvallen, dan leidt dit tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,23 m. In dat geval is er grote kans op overschrijding van het maalstoppeil, met name als het waait uit een ongunstige richting.
 - Met boezemcompartimentering:
 - Als alle boezemgemalen op maximale capaciteit draaien, dan blijft de invloed van compartimentering op de boezemwaterstand verwaarloosbaar klein. De variatie van de boezemwaterstand door wind kan nog steeds 0,13 m bedragen;

- Uitval van gemaal De Helsdeur pakt het ongunstigst uit. Dit leidt tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,11 m;
- Als alle boezemgemalen uitvallen, dan leidt dit tot een verhoging van de boezemwaterstand met ongeveer 0,25 m. In dat geval is er grote kans op overschrijding van het maalstoppeil, met name als het waait uit een ongunstige richting.

Het geheel overziend, ligt de bandbreedte voor de maatgevende boezemwaterstand voor ringdeel 2 en 3 globaal tussen NAP - 0,3 m (alle boezemgemalen op maximale capaciteit en wind uit gunstige richting) en NAP + 0,0 m (maalstoppeil, vanwege uitval van alle boezemgemalen en wind uit ongunstige richting), ervan uitgaande dat de maalstop niet faalt.

Zoals toegelicht in paragraaf 2.4, is het streefpeil van de Schermerboezem NAP – 0,50 m en bedraagt het maalstoppeil NAP + 0,00 m. Zoals toegelicht in paragraaf 3.4, is bij de toetsing op veiligheid door Hollands Noorderkwartier in 2011 en 2015 als maatgevende boezemwaterstand het maalstoppeil van de Schermerboezem gehanteerd.

Uit de voorgaande analyse is gebleken dat het maalstoppeil pas wordt overschreden bij zeer ongunstige omstandigheden: grootschalige uitval van boezemgemalen in combinatie met wind uit ongunstige richting. Een verlaging van de maatgevende boezemwaterstand naar ongeveer NAP - 0,2 m wordt haalbaar geacht, maar om dit te kunnen kwantificeren is inzicht nodig in de kans op uitval van boezemgemalen, de kans op niet-sluiten van het front om de Schermerboezem te compartimenteren en de kans op wind uit een bepaalde richting. Die informatie was in het kader van de gebiedspilot echter niet beschikbaar.

Bij de toetsing op veiligheid met als maatgevende boezemwaterstand het maalstoppeil (NAP + 0,00 m), hebben meerdere dijksecties binnen de ringdelen 2 en 3 de score 'onvoldoende' gekregen. Bij het streefpeil (NAP – 0,50 m) staan deze regionale waterkeringen permanent het streefpeil te keren en is er geen sprake van een veiligheidsprobleem. Dit illustreert dat een verlaging van de maatgevende boezemwaterstand naar NAP - 0,2 m potentie heeft om een grote verlaging van de veiligheidsopgave op te leveren.

Vanwege het verwachte positieve effect, wordt een vervolganalyse zinvol geacht.

Bijlage 17: Overstromingskansbenadering: Inzet van boezemcompartimentering als maatregel

Net als in Bijlage 16, wordt in de voorliggende bijlage verkend hoe de veranderingen die sinds 2017 zijn aangebracht in het regionale watersysteem, kunnen worden betrokken bij de veiligheidsanalyse van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Daarbij wordt gefocust op de inzet van boezemcompartimentering. Bij het afleiden van het vereiste beschermingsniveau in Bijlage 4, 6 en 7 is ervan uitgegaan dat het water van de Schermerboezem bij falen van een dijksectie zonder beperkingen polder Heerhugowaard kan instromen. Maar door de inzet van de in het systeem aanwezige boezemcompartimenteringswerken is het mogelijk om het aanliggende watersysteem te verkleinen en zo de gevolgen van een overstroming te beperken. In Bijlage 16 is al vermeld dat het mogelijk is om de Schermerboezem te compartimenteren, door het sluiten van een front bestaande uit vier boezemcompartimenteringswerken.

In de voorliggende bijlage wordt verkend of compartimentering van de Schermerboezem onderbouwing levert voor een versoepeling van het vereiste beschermingsniveau en op die manier leidt tot een beperking van de veiligheidsopgave. Dit krijgt invulling voor ringdeel 2 en 3 (zie voor de ligging Figuur 20) van de regionale waterkeringen rond polder Heerhugowaard. Voor deze ringdelen is namelijk een veiligheidsopgave afgeleid (zie Tabel 11) én ze bieden direct bescherming tegen de Schermerboezem. Omdat uit Bijlage 4, 6, 7 en 8 is gebleken, dat het economisch risico bepalend is voor het vereiste beschermingsniveau, wordt de analyse hiertoe beperkt.

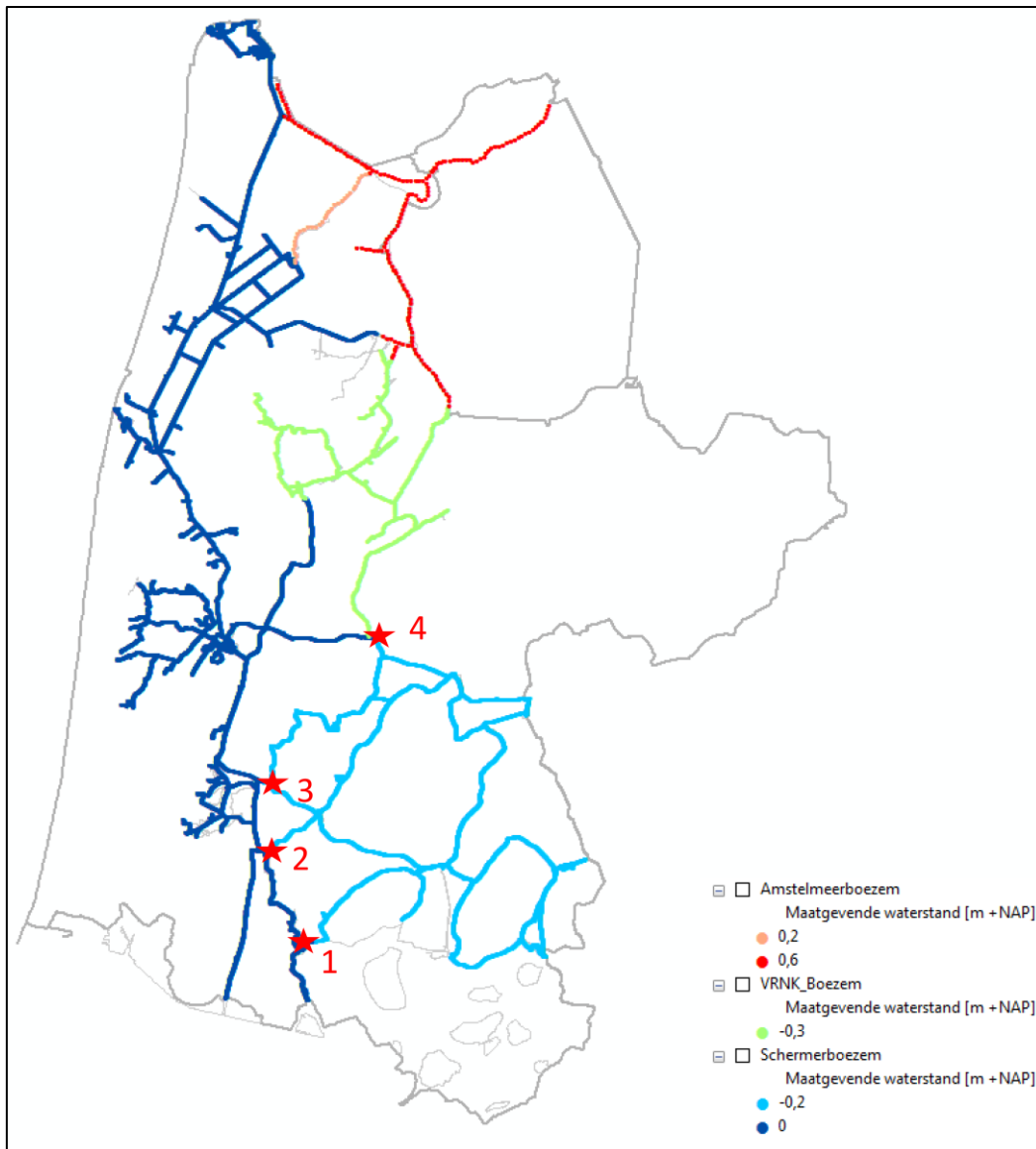
De centrale vraag in de voorliggende bijlage is: “Als een dijksectie binnen ringdeel 2 of 3 faalt, vanuit welk boezemcompartiment vindt er dan een overstroming plaats?”

Het front om de Schermerboezem te compartimenteren bestaat uit de volgende vier boezemcompartimenteringswerken:

1. BWO-kering Braaksloot-Het Kalf
2. BWO-kering Knollendammervaart
3. BWO-kering West-Grafdijk
4. Schotbalkkering Veldmanbrug

De aanduiding BWO verwijst naar de Wet Bescherming Waterstaatswerken in Oorlogstijd (Wet BWO) uit 1952. Deze wet kwam tot stand in de nasleep van de Tweede Wereldoorlog, maar met name door de oplopende internationale spanningen tijdens de Koude Oorlog. De wet stelde het Rijk en de provincies in staat maatregelen te treffen voor het aanleggen en aanpassen van waterstaatswerken om de dreiging voortkomend uit moderne oorlogsvoering aan te pakken. Onder de Wet BWO werd, met name in de westelijke provincies, een uitgebreid systeem van boezemscheidingen aangelegd. Met deze scheidingen konden boezemwateren worden afgescheiden van de rest van het watersysteem: mocht een bom een bres slaan in een waterkering, dan kon de waterschade in polders beperkt worden. In 1989 is de Wet BWO ingetrokken en is het beheer van de boezemcompartimenteringswerken daarna overgedragen aan de waterschappen (Siertsema, 2017; Hofman et al., 2018).

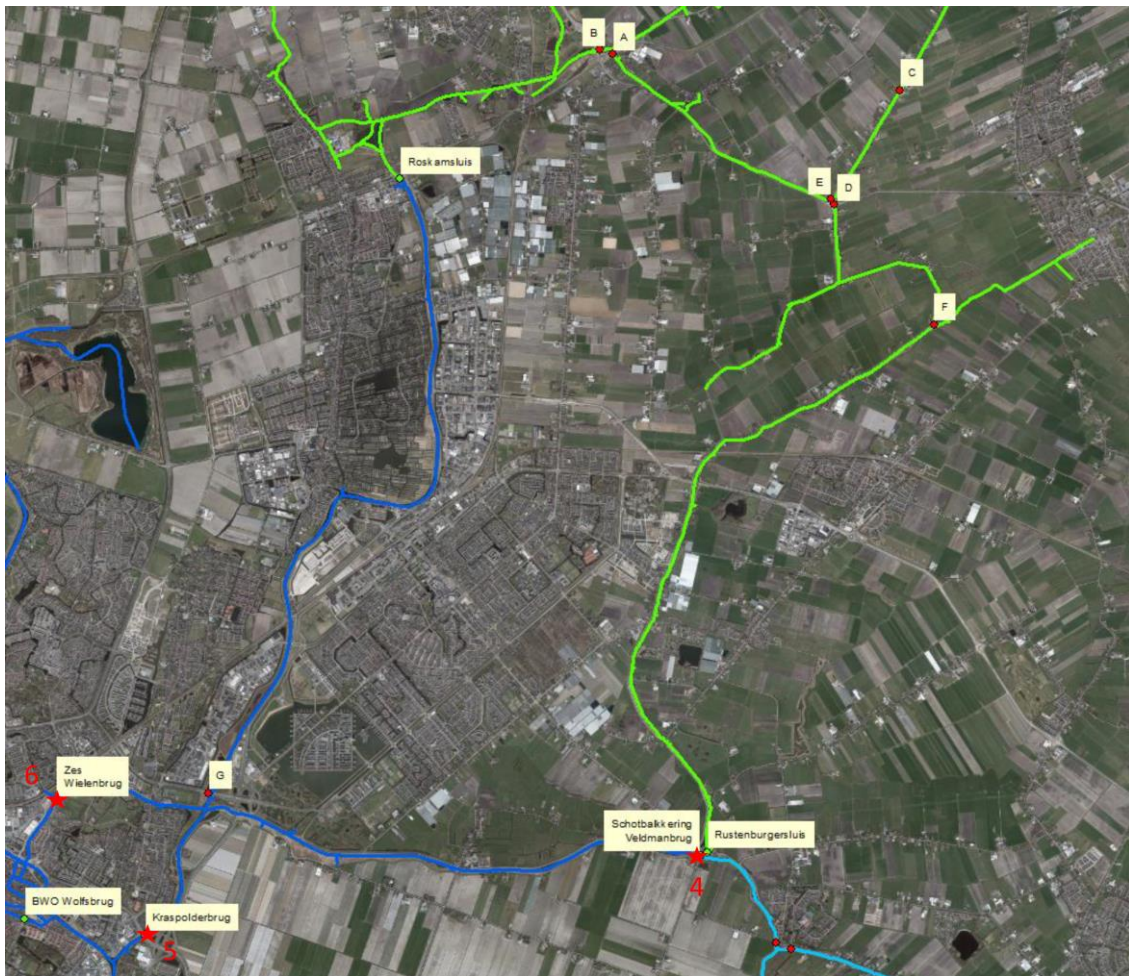
De ligging van de vier genoemde boezemcompartimenteringswerken wordt weergegeven in Figuur B17.1.



Figuur B17.1: Ligging werken voor compartimentering Schermerboezem

De vier compartimenteringskeringen worden (in principe) gesloten bij oplopend boezempeil. Vanaf dan is de Schermerboezem verdeeld in de Schermerboezem Hoog (donkerblauw gekleurd in Figuur B17.1), waarvoor als maatgevende waterstand NAP + 0,0 m geldt, en de Schermerboezem Laag (lichtblauw gekleurd in Figuur B17.1), waarvoor als maatgevende waterstand NAP – 0,2 m geldt. De Schermerboezem Hoog wordt dan bemalen door het Zaangemaal en door gemaal De Helsdeur en de Schermerboezem Laag door Gemaal C. Mantel en door Gemaal Monnickendam. Zie Figuur B16.1 voor de ligging van deze vier gemalen.

Er zijn mogelijkheden in het regionale watersysteem beschikbaar om de gevolgen van overstroming van polder Heerhugowaard nóg verder te beperken. Rond polder Heerhugowaard bevinden zich namelijk meer boezemcompartimenteringswerken. Deze worden getoond in Figuur B17.2.



Figuur B17.2: Ligging werken voor compartimentering Schermerboezem bij polder Heerhugowaard

Aangeduid met nummer 4 is weer Schotbalkkering Veldmanbrug te zien, als onderdeel van het front om de Schermerboezem Laag te scheiden van de Schermerboezem Hoog. Voor verdere compartimentering van de Schermerboezem Hoog zijn voor ringdeel 2 en 3 de onderstaande twee boezemcompartimenteringswerken relevant:

5. Kraspolderbrug
6. Zes Wielenbrug

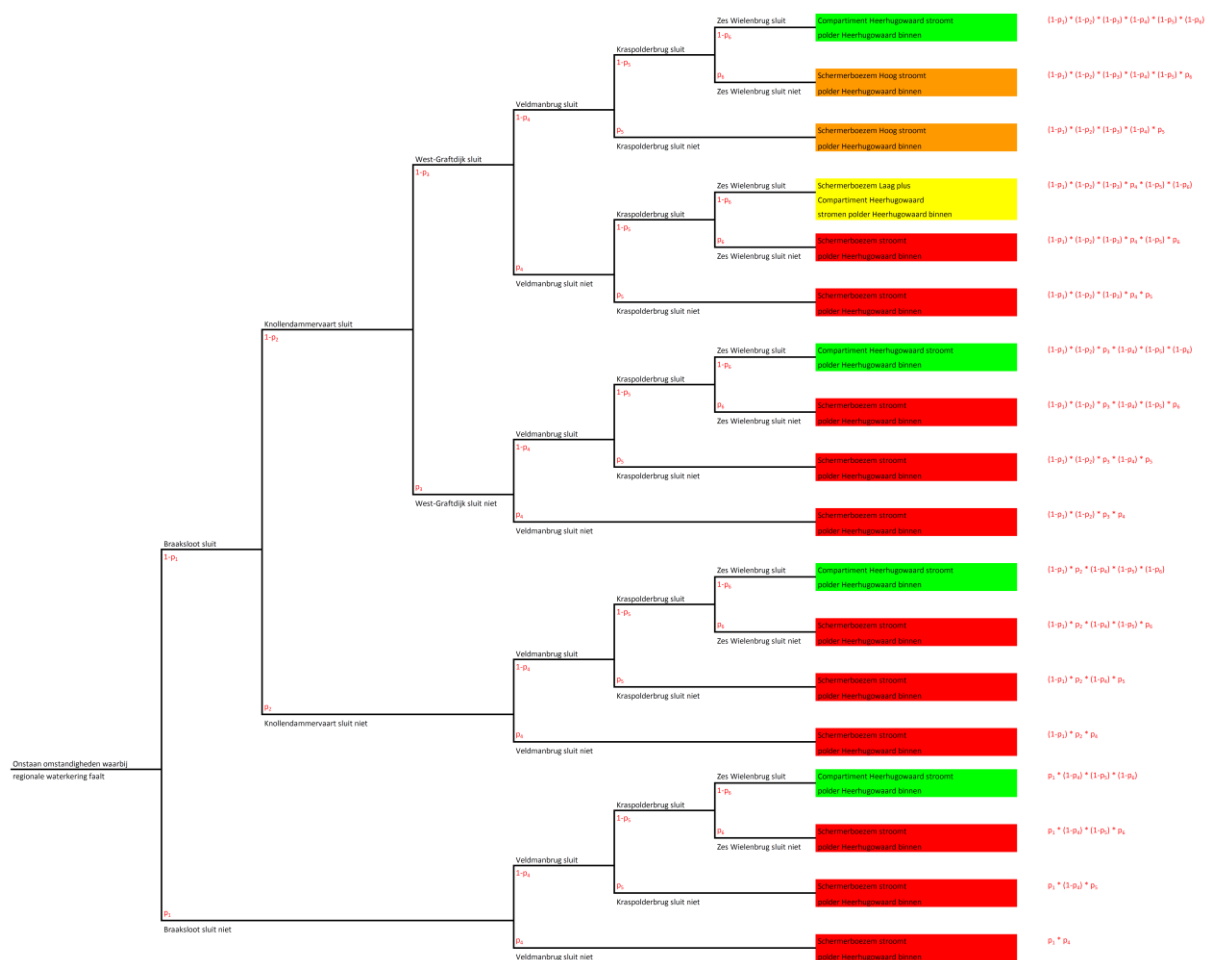
Inzet van boezemcompartimentering gaat gepaard met versnippering van bergend vermogen en boezemgemaalcapaciteit. De boezemcompartimenteringswerken 5 en 6 worden daarom pas gesloten na falen van een dijksectie die onderdeel uitmaakt van ringdeel 2 of ringdeel 3. Dat betekent dat sluiting moet plaatsvinden bij stroming in de boezem.

Voor de duidelijkheid wordt nog opgemerkt dat de in Figuur B17.2 getoonde kunstwerken Roskamsluis en Rustenburgersluis, die de scheiding vormen tussen de Schermerboezem en de VRNK-boezem, altijd gesloten zijn vanwege een verschil in streefpeil tussen deze twee boezemstelsels.

Het sluiten van de boezemcompartimenteringswerken 1, 2, 3 en 4 voor het compartimenteren van de Schermerboezem, heeft een directe relatie met de inzet van de twee nieuwe boezemgemalen bij het Markermeer. Daarom mag worden aangenomen dat de maatregelen die eventueel nodig waren om de betreffende boezemcompartimenteringswerken te laten voldoen aan de sterkte-eisen, reeds zijn genomen en bekostigd (zie in dat verband ook het intermezzo in Bijlage 16). De faalkans van de boezemcompartimenteringswerken 1, 2, 3 en 4 is daarmee verwaarloosbaar klein voor wat betreft

de faalmechanismen ‘hoogte kunstwerk’, ‘piping bij kunstwerk’ en ‘sterkte en stabiliteit kunstwerk’. Voor de boezemcompartimenteringswerken 5 en 6 is een check op sterkte-aspecten nog relevant en moeten de kosten van eventuele maatregelen in de beschouwing worden betrokken. Vooralnog wordt ervan uitgegaan dat er geen maatregelen vanwege sterkte-aspecten nodig zijn. Door deze aanname wordt de aandacht bij de verdere analyse uitsluitend gericht op het faalmechanisme ‘betrouwbaarheid sluiting kunstwerk’ van ieder boezemcompartimenteringswerk: de kans op niet-sluiten.

Afhankelijk van de mate van succes om de verschillende boezemcompartimenteringswerken te sluiten, zijn er scenario's af te leiden voor het boezemcompartiment dat polder Heerhugowaard kan instromen bij falen van een dijksectie die onderdeel uitmaakt van ringdeel 2 of ringdeel 3. Deze scenario's worden getoond in Figuur B17.3. Met rode tekst is bij ieder boezemcompartimenteringswerk de kans op wel of niet sluiten getoond en de resulterende kans per deelscenario.



Figuur B17.3: Gebeurtenissenboom inzet boezemcompartimentering, met kansen per deelscenario

Door de in Figuur B17.3 vermelde kansen per deelscenario te combineren kan de kans worden bepaald op een (met kleur gemarkeerd) scenario waarbij polder Heerhugowaard overstroomt vanuit:

- Schermerboezem
- Schermerboezem Hoog
- Schermerboezem Laag + Compartiment Heerhugowaard
- Compartiment Heerhugowaard

Hieruit blijkt dat de centrale vraag “Als een dijksectie binnen ringdeel 2 of 3 faalt, vanuit welk boezemcompartiment vindt er dan een overstroming plaats?” alleen kan worden beantwoord in termen van kansen.

Om aan deze scenariokansen getalsmatig invullen te kunnen geven, is voor ieder boezemcompartimenteringswerk inzicht nodig in de aanwezige kans op niet-sluiten. Om die te kunnen bepalen is voor ieder boezemcompartimenteringswerk een faalkansanalyse nodig. Dit gaat voor de voorliggende gebiedspilot te diep. Daarom is gewerkt met een inschatting van de kans op niet-sluiten, aangevuld met een gevoeligheidsanalyse. Daarbij is steeds gekeken naar het type sluitmiddel en naar de omstandigheden waarin de sluiting moet plaatsvinden. Het resultaat van de inschatting is te zien in Tabel B17.1.

Nummer	Naam	Type sluitmiddel	Sluitstrategie	Basiswaarden kans op niet-sluiten [1/vraag]
1	BWO-kering Braaksloot-Het Kalf	dubbele toldeurkering	sluiten bij oplopend boezempeil	1/500
2	BWO-kering Knollendamervaart	dubbele toldeurkering	sluiten bij oplopend boezempeil	1/500
3	BWO-kering West-Grafdijk	schulpstuw	sluiten bij oplopend boezempeil	1/1.000
4	Schotbalkkering Veldmanbrug	schotbalkkering met 2 paar schotbalkspinningen	sluiten bij oplopend boezempeil	1/100
5	Kraspolderbrug	schotbalkkering met 2 paar schotbalkspinningen	mogelijk sluiten na falen regionale waterkering	1/10
6	Zes Wielenbrug	schotbalkkering	mogelijk sluiten na falen regionale waterkering	1/20

Tabel B17.1: Inschatting basiswaarden aanwezige kans op niet-sluiten boezemcompartimenteringswerk

De resulterende scenariokansen staan, samen met de uitkomst van een gevoeligheidsanalyse (steeds ten opzichte van de basiswaarden), vermeld in Tabel B17.2. De meest rechtse kolom is toegevoegd om de situatie te beschouwen dat een dijksectie binnen ringdeel 2 of 3 plotseling faalt en de boezemcompartimenteringswerken 1, 2, 3 en 4 voorafgaand nog niet zijn gesloten.

Overstroming vanuit	Scenariokans voor basiswaarden kans op niet-sluiten [%]	Scenariokans voor 5 maal betere waarden kans op niet-sluiten [%]	Scenariokans voor 5 maal slechtere waarden kans op niet-sluiten [%]	Scenariokans voor 10 maal slechtere waarden kans op niet-sluiten werken 1, 2, 3 en 4 [%]
Schermerboezem	0,2	0,0	4,6	2,5
Schermerboezem Hoog	14,3	3,0	57,9	12,4
Schermerboezem Laag + Compartiment Heerhugowaard	0,9	0,2	1,8	8,1
Compartiment Heerhugowaard	84,6	96,8	35,6	77,0
	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabel B17.2: Scenariokansen voor overstroming vanuit verschillende boezemcompartimenten

Bij de gehanteerde brede set aan kansen op niet-sluiten blijkt het scenario van overstroming vanuit de gehele Schermerboezem niet heel waarschijnlijk te zijn. Afhankelijk van de precieze waarden, is een overstroming vanuit het compartiment Heerhugowaard of een overstroming vanuit de Schermerboezem Hoog het meest waarschijnlijk. Voor meer eenduidigheid hierover is, zoals eerder al opgemerkt, een betere onderbouwing van de kans op niet-sluiten van de verschillende boezemcompartimenteringswerken nodig.

In Bijlage 3 is ingegaan op de beschikbare overstromingsinformatie. Er zijn alleen analyses gemaakt voor overstroming vanuit de gehele Schermerboezem; analyses van overstroming vanuit boezemcompartimenten zijn tot nu toe niet gemaakt. Dat het onderscheid relevant is, blijkt als wordt gekeken naar de oppervlakte van de verschillende compartimenten van de Schermerboezem. Deze staan in Tabel B17.3 (N. Postma, persoonlijke communicatie, 3 februari 2020).

Boezemwater	Oppervlakte [m ²]
Schermerboezem	19.568.104
Schermerboezem Hoog	15.453.214
Schermerboezem Laag	4.114.890
Compartiment Heerhugowaard	668.801

Tabel B17.3: Oppervlakte compartimenten Schermerboezem

Op het ontbreken van analyses van overstroming vanuit compartimenten is ingespeeld door de in Tabel B17.2 vermelde scenariokansen te combineren met de in Tabel B17.3 vermelde wateroppervlakten. Op deze wijze is in aanmerking genomen dat een scenario met een kleine kans toch grote gevolgen kan hebben. Om dit in rekening te brengen is een gewogen wateroppervlakte bepaald, die wordt weergegeven in Tabel B17.4.

Overstroming vanuit	Gewogen oppervlakte voor basiswaarden kans op niet-sluiten [m ²]	Gewogen oppervlakte voor 5 maal betere waarden kans op niet-sluiten [m ²]	Gewogen oppervlakte voor 5 maal slechtere waarden kans op niet-sluiten [m ²]	Scenariokans voor 10 maal slechtere waarden kans op niet-sluiten werken 1, 2, 3 en 4 [m ²]
Schermerboezem	43.231	1.786	908.749	491.709
Schermerboezem Hoog	2.207.235	459.125	8.947.793	1.917.417
Schermerboezem Laag + Compartiment Heerhugowaard	40.696	9.273	87.470	388.881
Compartiment Heerhugowaard	566.107	647.573	238.260	514.642
	2.857.270	1.117.757	10.182.271	3.312.649

Tabel B17.4: Gewogen wateroppervlakte

De gewogen wateroppervlakte is vervolgens uitgedrukt in een percentage ten opzichte van de wateroppervlakte van de gehele Schermerboezem (waarvoor immers wel overstromingsanalyses beschikbaar zijn). Het resultaat van deze analyse is opgenomen in Tabel B17.5.

Percentage gewogen oppervlakte voor basiswaarden kans op niet-sluiten [%]	Percentage gewogen oppervlakte voor 5 maal betere waarden kans op niet-sluiten [%]	Percentage gewogen oppervlakte voor 5 maal slechtere waarden kans op niet-sluiten [%]	Scenariokans gewogen oppervlakte voor 10 maal slechtere waarden kans op niet-sluiten werken 1, 2, 3 en 4 [%]
14,6	5,7	52,0	16,9

Tabel B17.5: Percentage gewogen wateroppervlakte

De achterliggende gedachte hierbij is, dat het in Tabel B17.5 vermelde percentage ook de verhouding weergeeft tussen de schade die ontstaat bij overstroming na compartimentering van de Schermerboezem en de schade die ontstaat bij overstroming vanuit de gehele Schermerboezem. De zo gevonden schade is gebruikt om voor ringdeel 2 en 3 de vereiste faalkans vanwege economisch risico te bepalen, uitgaande van de 'situatie 2050'. Dit conform de in Bijlage 5 en 6 beschreven aanpak. Het resultaat van deze analyse is te zien in Tabel B17.6.

Ringdeel	Vereiste faalkans zonder boezemcompartimentering $P_{F\text{-vereist, ringdeel, KBA}}$ [1/jaar]	Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij basiswaarden kans op niet sluiten $P_{F\text{-vereist, ringdeel, KBA}}$ [1/jaar]	Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 5 maal betere waarden kans op niet sluiten $P_{F\text{-vereist, ringdeel, KBA}}$ [1/jaar]	Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 5 maal slechtere waarden kans op niet sluiten $P_{F\text{-vereist, ringdeel, KBA}}$ [1/jaar]	Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 10 maal slechtere waarden kans op niet sluiten werken 1, 2, 3 en 4 $P_{F\text{-vereist, ringdeel, KBA}}$ [1/jaar]
2	1/37.306	1/5.447	1/2.126	1/19.399	1/6.313
3	1/8.490	1/1.239	1/484	1/4.415	1/1.389

Tabel B17.6: Vereiste faalkans, bij varianten inzet boezemcompartimentering

Uit Tabel B17.6 blijkt dat het in rekening brengen van boezemcompartimentering van wezenlijke invloed kan zijn op de vereiste faalkans.

Op dezelfde wijze als beschreven in Bijlage 9, zijn vervolgens bij iedere variant de signaleringswaarde en ondergrens bepaald. Tabel B17.7 geeft het resultaat weer.

Ringdeel	Vereiste faalkans zonder boezemcompartimentering		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij basiswaarden kans op niet sluiten		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 5 maal betere waarden kans op niet sluiten		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 5 maal slechtere waarden kans op niet sluiten		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 10 maal slechtere waarden kans op niet sluiten werken 1, 2, 3 en 4	
	Signaleringswaarde $P_{\text{vereist, ringdel, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens $P_{\text{vereist, ringdel, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde $P_{\text{vereist, ringdel, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens $P_{\text{vereist, ringdel, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde $P_{\text{vereist, ringdel, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens $P_{\text{vereist, ringdel, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde $P_{\text{vereist, ringdel, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens $P_{\text{vereist, ringdel, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde $P_{\text{vereist, ringdel, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens $P_{\text{vereist, ringdel, ondergrens}}$ [1/jaar]
2	1/9.000	1/10.000	1/3.000	1/1.000	1/3.000	1/1.000	1/20.000	1/10.000	1/10.000	1/3.000
3	1/10.000	1/3.000	1/3.000	1/300	1/300	1/300	1/3.000	1/1.000	1/1.000	1/300

Tabel B17.7: Signaleringswaarde en ondergrens, bij varianten inzet boezemcompartimentering

Zoals toegelicht in paragraaf 4.4, is in deze gebiedspilot als uitgangspunt gehanteerd dat voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts 80% beschikbaar is van de in Tabel B17.7 vermelde waarden. Wanneer dit uitgangspunt wordt verwerkt, dan resulteren hieruit de in Tabel B17.8 vermelde signaleringswaarde en ondergrens voor het faalmechanisme macrostabiliteit.

Ringdeel	Vereiste faalkans zonder boezemcompartimentering		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij basiswaarden kans op niet sluiten		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 5 maal betere waarden kans op niet sluiten		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 5 maal slechtere waarden kans op niet sluiten		Vereiste faalkans met boezemcompartimentering, bij 10 maal slechtere waarden kans op niet sluiten werken 1, 2, 3 en 4	
	Signaleringswaarde macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, ondergrens}}$ [1/jaar]	Signaleringswaarde macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, signering}}$ [1/jaar]	Ondergrens macrostabiliteit binnenwaarts $P_{\text{vereist, ringdel, stab.bis, ondergrens}}$ [1/jaar]
2	1/37.500	1/12.500	1/3.750	1/1.250	1/3.750	1/1.250	1/23.500	1/12.500	1/12.500	1/3.750
3	1/12.500	1/3.750	1/3.750	1/375	1/375	1/375	1/3.750	1/1.250	1/1.250	1/375

Tabel B17.8: Signaleringswaarde en ondergrens voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, bij varianten inzet boezemcompartimentering

De vereiste faalkansen in Tabel 17.8 zijn vervolgens, op dezelfde wijze als beschreven in Bijlage 13, afgezet tegen de (resultierend) aanwezige faalkans, zoals vermeld in Tabel 10. Dit leidt tot de toetsoordelen zoals opgenomen in Tabel B17.9.

Ringdeel	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts zonder boezemcompartimentering	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts met boezemcompartimentering bij basiswaarden kans op niet sluiten	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts met boezemcompartimentering bij 5 maal betere waarden kans op niet sluiten	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts met boezemcompartimentering bij 5 maal slechtere waarden kans op niet sluiten	Toetsoordeel macrostabiliteit binnenwaarts met boezemcompartimentering bij 10 maal slechtere waarden kans op niet sluiten werken 1, 2, 3 en 4
2	V_t	III_t	III_t	V_t	V_t
3	V_t	III_t	III_t	IV_t	III_t

Tabel B17.9: Toetsoordelen voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts, bij varianten inzet boezemcompartimentering

Tabel B17.9 laat zien dat het in rekening brengen van boezemcompartimentering leidt tot een beperking van de veiligheidsopgave of zelfs tot het verdwijnen hiervan.

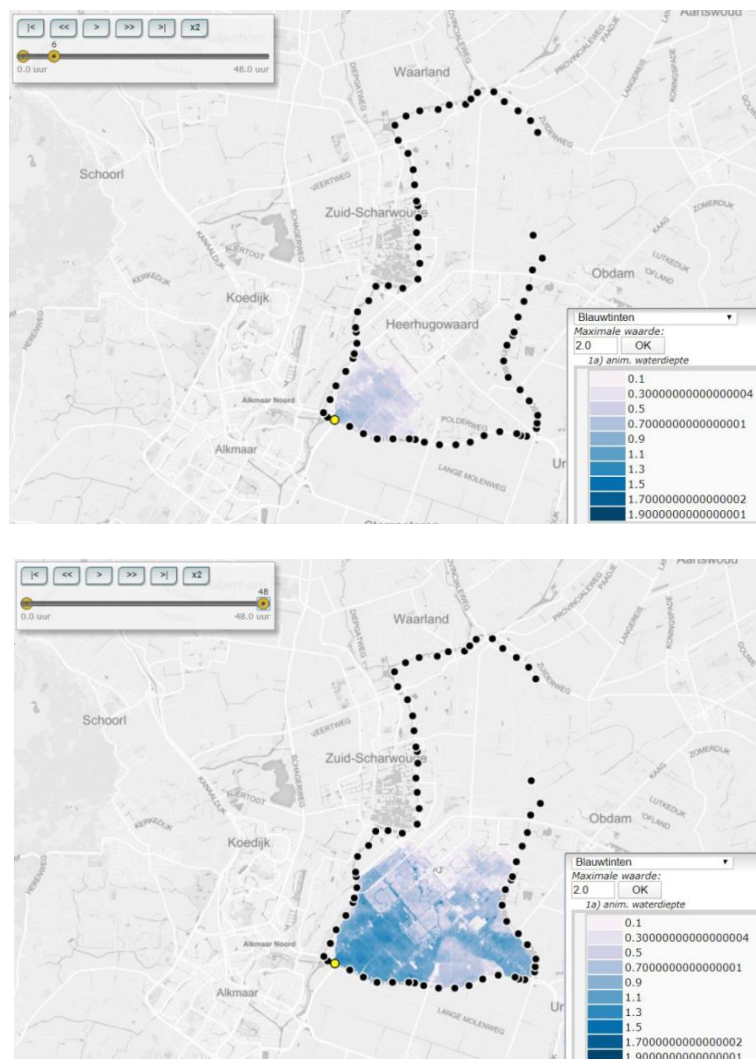
Vanwege het positieve effect, wordt een vervolganalyse zinvol geacht. De eerste stap hierbij is om een faalkansanalyse uit te voeren om te komen tot beter onderbouwde waarden van de aanwezige kans op niet-sluiten van ieder boezemcompartimenteringswerk. Met name de kans op niet-sluiten van de boezemcompartimenteringswerken 4, 5 en 6 is bepalend voor het eindresultaat. Mocht dat nodig zijn, dan is de vervolgstap om te kijken welke maatregelen nodig zijn om de kans op niet-sluiten te verbeteren. De kosten daarvan horen uiteraard in de analyse te worden betrokken. Door het uitvoeren van analyses van overstrooming vanuit compartimenten, kunnen de baten van het in

rekening brengen van boezemcompartimentering beter worden onderbouwd. Vervolgens kan een vergelijking worden gemaakt met de kosten en baten van kadeverbetering en kan onderbouwd worden gekozen voor de maatregel die het meest doelmatig (kosteneffectief) is.

Voor een eventuele vervolganalyse zijn twee aandachtspunten relevant om te vermelden.

De boezemcompartimenteringswerken 1, 2, 3 en 4 worden gesloten bij oplopend peil op de Schermerboezem. Daarmee zijn deze boezemcompartimenteringswerken in principe gesloten bij falen van een dijksectie die onderdeel uitmaakt van ringdeel 2 of ringdeel 3 (tenzij er sprake is van plotseling falen). Dat ligt in ieder geval anders bij de boezemcompartimenteringswerken 5 en 6; die worden pas gesloten na falen van een dijksectie. Dit betekent dat er tijd zit tussen het falen van deze dijksectie en de sluiting van deze beide boezemcompartimenteringswerken. Binnen deze tijd zal polder Heerhugowaard overstromen vanuit de Schermerboezem Hoog (ervan uitgaande dat de boezemcompartimenteringswerken 1, 2, 3 en 4 reeds succesvol zijn gesloten).

De schade die kan ontstaan in de tijd die nodig is om te komen tot een succesvolle sluiting van een boezemcompartimenteringswerk behoort in de vervolganalyse te worden meegenomen. Stel dat de benodigde sluitingstijd 6 uur is. Zoals toegelicht in Bijlage 3, is als simulatieduur 48 uur gehanteerd voor de analyses van overstroming vanuit de gehele Schermerboezem. In Figuur B17.4 wordt een beeld gegeven van de omvang van de overstroming vanuit de gehele Schermerboezem na 6 uur en na 48 uur, bij falen van een regionale waterkering binnen ringdeel 2.



Figuur B17.4: Illustratie van invloed tijdsverloop overstroming vanuit gehele Schermerboezem na falen van regionale waterkering in ringdeel 2: resultaat na 6 uur en na 48 uur (<https://flooding.lizard.net/>)

Als laatste aandachtspunt wordt opgemerkt dat compartimentering kan leiden tot het ontstaan van wateren van beperkte afmetingen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het compartiment Heerhugowaard. Het gevolg is dat het falen van een dijksctie die onderdeel uitmaakt van ringdeel 2 of ringdeel 3 kan leiden tot een grote peildaling in het compartiment of zelfs tot het droogvallen ervan. Dit kan leiden tot buitenwaarts afschuiven van de overliggende boezemkade. Bij de kadeverschuiving van Wilnis op 26 augustus 2003 is gebleken dat de resulterende aantasting en dus schade wezenlijk kan zijn. Figuur B17.5 geeft hiervan een beeld.

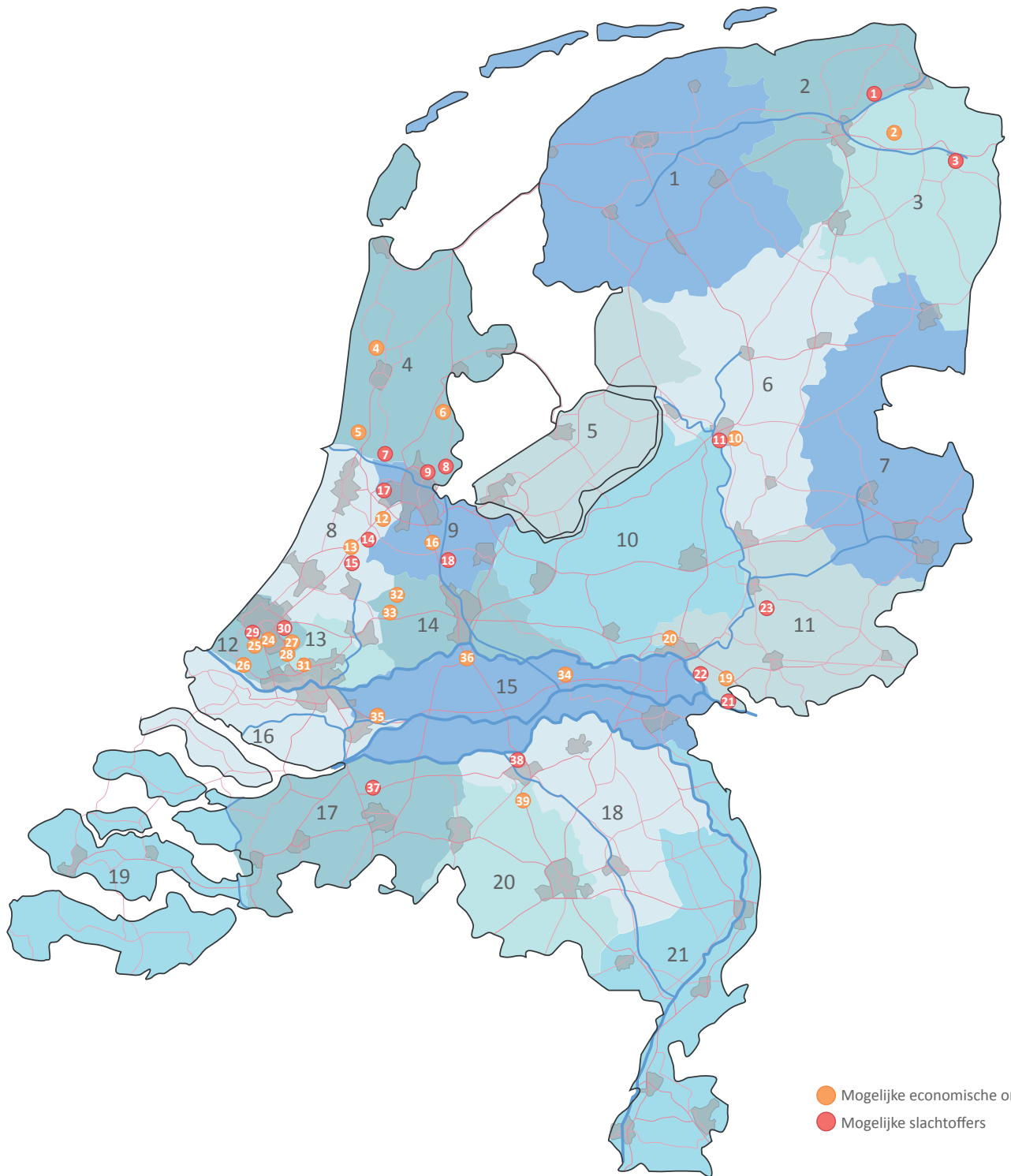


Figuur B17.5: Wilnis: Zicht op overliggende zijde op 4 september 2003 (9 dagen na de kadeverschuiving). Zichtbaar zijn de vrijgekomen fundering van een woning, resten van leidingen, verzakte bomen, het restant van een tuinafscheiding en de onderuitgezakte beschoeiingsconstructie met gronddoek en autobanden als fenders

Ook dit is een punt dat in een vervolganalyse een plek zou moeten krijgen.

In het verlengde hiervan moet worden geborgd dat de betreffende boezemcompartimenteringswerken qua sterkte-aspecten in staat zijn om te blijven functioneren in het geval van een grote peildaling of zelfs het droogvallen van een compartiment. Als hiervoor maatregelen nodig zijn, dan moeten de hieraan verbonden kosten in de analyse worden betrokken.

VERKENNING BASISVEILIGHEID EN ECONOMISCHE ONTWICHTING IN RELATIE TOT HET REGIONALE SYSTEEM



- Mogelijke economische ontzrichting
- Mogelijke slachtoffers

1. WETTERSKIP FRYSLÂN

Geen LIR of economische ontzrichting

2. NOORDERZIJLVEST

- 1 Woltersum

3. HUNZE EN AAS

- 2 Slochteren
- 3 Winschoten

4. HOLLANDS NOORDERKWARTIER

- 4 RWZI's zoals bij Geestmerambacht
- 5 Bedrijventerrein en 380kV station Beverwijk
- 6 Spoorlijn Hoorn - Purmerend
- 7 Westzanerpolder
- 8 Diepe polders in waterland (Belmermeer, enz)
- 9 Buikslotermeer

5. ZUIDERZEELAND

Geen LIR of economische ontzrichting

6. DRENTS OVERIJSELSE DELTA

- 10 Zwolle Zuid
- 11 Zwolle Zuid

7. VECHTSTROMEN

Geen LIR of economische ontzrichting

8. RIJNLAND

- 12 Schiphol
- 13 Knooppunt A4-A44
- 14 Polders rondom het Braassemermeer
- 15 Aalsmeer

9. AMSTEL GOOI EN VECHT

- 16 A2
- 17 IPO-III polders
- 18 IPO-III polders

10. VALLEI EN VELUWE

Geen LIR of economische ontzrichting

11. RIJN EN IJSEL

- 19 Betuweroute
- 20 A12
- 21 Tuindorp
- 22 Rijnstrangen
- 23 Kanaal van Hackfort

12. DELFLAND

- 24 RW A4 en spoorweg Den Haag - Delft
- 25 380 kV station Wateringen
- 26 Spoorweg Hoek van Holland - Rotterdam
- 27 Zuidpolder van Delfsgauw
- 28 A13
- 29 Wateringen
- 30 Ypenburg

13. SCHIELAND EN DE KRIMPENERWAARD

- 31 Vliegveld zestienhoven

14. STICHTSE RIJNLANDEN

- 32 Drinkwaterwinning Oase bij de Grechtkade-Oost
- 33 Hofpoort Ziekenhuis Woerden

15. RIVIERENLAND

- 34 Betuweroute
- 35 A15
- 36 A2 - A27

16. HOLLANDSE DELTA

Geen LIR of economische ontzrichting

17. BRABANTSE DELTA

- 37 Terheijden

18. AA EN MAAS

- 38 Maaspoot

19. SCHELDESTROMEN

Geen LIR of economische ontzrichting

20. DE DOMMEL

- 39 De A2 onder 's-Hertogenbosch

21. LIMBURG

Geen LIR of economische ontzrichting



Overschrijdingskans Overstromingskans regionale keringen

Technische vergelijking tussen de
overschrijdingskans en overstromingskans

Opdrachtgever

HKV
LIJN IN WATER

stowa

STOWA



Overschrijdingskans Overstromingskans regionale keringen



Technische vergelijking tussen de
overschrijdingskans en overstromingskans

Eindrapport

Auteur
Bob Maaskant

PR3987.10
november 2020

Inhoud

1	Inleiding	7
1.1	Doel	7
2	Normeren	9
2.1	Achtergrond	9
2.2	Doel van normeren	9
2.3	Varianten voor normeren	10
3	Overschrijdingskans vs. Overstromingskans	11
3.1	Definitie	11
3.2	Relatie overstromingskans en overschrijdingskans	11
3.3	Lengte effect	14
3.4	Faaldefinities	15
3.5	Modellen en methoden	16
3.6	Relatie met beheer	17
3.7	Aansluiting huidige werkwijze	18
4	Nut en Noodzaak van de overstromingskans	19
5	Handelingsperspectief	20

1 Inleiding

Regionale waterkeringen zijn niet-primaire waterkeringen die zijn opgenomen in de legger/keur van het Waterschap en Rijk en/of is aangewezen op basis van een provinciale verordening. Er zijn verschillende typen regionale keringen te onderscheiden, boezemkaden (en polderkaden); Keringen langs regionale rivieren, langs kanalen en wateropslagbekkens; Compartimenteringsdijken, secundaire dijken, slaperdijken en landscheidingen; Voorlandkeringen en zomerkades. Elk van deze type heeft zijn eigen functie en belang. Bij het normeren van de regionale keringen geldt momenteel de overschrijdingskansnorm gebaseerd op de omvang van de schade in het achterliggende gebied als gevolg van het falen van de regionale kering.

Momenteel loopt er vanuit de STOWA een ontwikkelprogramma regionale keringen waarbij naar de hele keten rondom regionale keringen wordt gekeken: normeren, beoordelen, versterken en beheren. Vanuit de techniek en kijkend naar de veiligheid van de regionale keringen is er een aantal aspecten die nader onderzocht worden. De belangrijkste daarin is het verschil tussen een overschrijdingskansnorm en een overstromingskansnorm. Dit is een belangrijk punt omdat voor de primaire waterkeringen is overgestapt van een overschrijdingskansnorm naar een norm uitgedrukt in een overstromingskans.

1.1 Doel

Doel van dit rapport is het definiëren van technisch-inhoudelijke argumenten voor de norm als overschrijdingskans en als overstromingskans t.b.v. de besluitvorming, waarbij uiteindelijk de Begeleidingsgroep Visie een advies opstelt en de Stuurgroep uiteindelijk beslist.

2 Normeren

2.1 Achtergrond

In de huidige systematiek worden de regionale keringen genormeerd op basis van optredende schade en de daaraan gerelateerde IPO-normklasse (1 t/m 5). De onderliggende methodiek voor het normeren op basis van de deze klassen stamt uit de jaren 90. Door Fugro is in opdracht van de provincie Zuid-Holland onder verantwoordelijkheid van de werkgroep Normering Boezemkaden een methodiek opgesteld ten behoeve van het normeren van de boezemkades.

Bij de keuze van de methode is een belangrijke achtergrond dat één van de uitgangspunten was dat de norm voor de boezemkades een afgeleide is van de norm voor de primaire keringen. Waarbij de toename van het economisch risico als gevolg van het falen van een boezemkade de maat is voor het afleiden van de norm.

De achtergrond van de huidige normstelling is dus risicogebaseerd, waarbij de faalkans (overstromingskans) van de boezemkade en de bijbehorende gevolgen terug zijn vertaald naar een overschrijdingskans norm (overbelastingsnorm).

Een belangrijk onderscheid dat gemaakt dient te worden is enerzijds het afleiden van de norm en het doel dat daarmee bereikt moet worden en anderzijds de rekenmethoden om te bepalen of aan deze norm wordt voldaan.

2.2 Doel van normeren

In het kader van de ketenanalyse regionale keringen is het belangrijk om opnieuw vast te stellen wat het doel is van de normering, wat moet de norm beschrijven. Beschrijft de norm de kans op een overstroming van een achterliggend gebied of is het de kans op schade aan de waterkering. Dit verschil bepaald namelijk op welke wijze de vertaling van de norm naar de toets- en ontwerppraktijk wordt gemaakt.

De keuze van wat de norm moet beschrijven of wat we als sector willen dat de norm beschrijft staat los van de keuze of de uiteindelijke norm een overschrijdingskans dan wel een overstromingskans moet zijn.

2.3 Varianten voor normeren

Voor de normering zijn verschillende varianten denkbaar. Zo kan de norm de kans beschrijven dat een achterliggend gebied overstroomt of de norm beschrijft de kans dat de waterkering beschadigd.

Dit zijn twee verschillende type normen die voor verschillende doeleinden geschikt zijn. Het duidelijk definiëren wat onder de norm wordt verstaan en wat het doel is van de norm is essentieel om later de juiste vertaling te maken naar eisen aan de waterkering en op een juiste manier te beoordelen en te versterken.

In het volgende hoofdstuk wordt nader ingegaan op de verschillen tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans. En wat de voor- en nadelen zijn van beide type voor het normeren van regionale keringen.

Maar zoals hierboven geschetst is de basisvraag wat de norm moet beschrijven ook een zeer relevante vraag voor verdere uitwerking van de toekomstige wijze van normering regionale keringen.

Daarnaast wordt kort aandacht besteedt aan de wijze waarop aan deze normen getoetst kan worden. Een keuze in één van beide normeringstypen betekent niet direct ook een andere methodiek van beoordelen.

3 Overschrijdingskans vs. Overstromingskans

3.1 Definitie

De huidige definitie van beide type kansen als norm voor regionale kering is als volgt:

- De normoverschrijdingskans beschrijft de kans van optreden van de maximale waterstand bij de norm die een doorsnede van de waterkering veilig moet kunnen keren.
- De normoverstromingskans beschrijft de kans op het optreden van een overstroming in het gebied dat de regionale kering beschermt.

In de definitie is direct te zien dat de overschrijdingskans betrekking heeft op de waterkering zelf en de overstromingskans op het te beschermen gebied.

Ook de lengte-eenheid waarop de norm op van toepassing is, is verschillend. Zo geldt de overschrijdingskans voor elke doorsnede in een waterkering en geldt de overstromingskans voor een deel van de waterkering dat ongeveer hetzelfde gebied beschermt tegen een overstroming.

De kern van het verschil is het wel of niet doorbreken van de kering. De overschrijdingskans gaat uit van schade aan de kering maar geen doorbreken en de overstromingskans gaat uit van het falen van de kering.

Voor de regionale keringen geldt dat deze norm is gebaseerd is op een acceptabel schaderisico. Dit impliceert dat deze norm in feite het voorkomen van een overstroming beschrijft. In de huidige werkwijze met de overschrijdingsfrequentie wordt verondersteld dat overstromingskans gelijk is aan 0,2 maal de overschrijdingsfrequentie (Veiligheid van Boezemkaden, Ontwikkeling van een nieuwe Beoordelingsmethode, 1997).

3.2 Relatie overstromingskans en overschrijdingskans

De vraag die vaak terug komt is dat met de overstromingskansbenadering het veel ingewikkelder wordt dan met een overschrijdingskansbenadering en dat er meer gegevens nodig zijn. Dit is echter niet het geval. Dit komt doordat de overschrijdingskans een afgeleide is van de overstromingskans, waarbij op basis van (conservatieve) keuzes een verdeling over de mechanismen en de lengte wordt gemaakt. Indien met de overschrijdingskansbenadering een berekening wordt uitgevoerd dan kan met dezelfde gegevens ook een overstromingskans berekend worden.

De overschrijdingskansbenadering en de overstromingskansbenadering zijn eigenlijk twee manieren om met onzekerheden om te gaan bij de beoordeling van de sterkte van waterkeringen. Hoewel de overschrijdingskansbenadering eenvoudiger is in het gebruik, maakt de overstromingskansbenadering het mogelijk om voor een kering een bepaald beschermingsniveau gericht te bereiken. Dit kan door keuzes die vooraf zijn gemaakt rondom lengte-effect, faalkansverdeling te heroverwegen.

De inhoudelijke verschillen tussen de overschrijdings- en overstromingskansbenadering hebben vooral betrekking op de manier waarop met de onzekerheden over de belastingen en sterkte-eigenschappen wordt omgegaan: impliciet (via karakteristieke waarden en veiligheidsfactoren) of expliciet (via de kansen op de verschillende waarden die de belastingen en de sterkte kunnen hebben).

In de overstromingskansbenadering worden de onzekerheden over de belastingen en sterkte-eigenschappen tot uitdrukking gebracht in de kans dat de belasting groter is dan de sterkte, zodat er een overstroming plaatsvindt. Dat wordt gedaan door alle mogelijke belastingen en sterkte-eigenschappen met hun kans van voorkomen te wegen.

Bij de overschrijdingskansbenadering lijkt er daarentegen sprake te zijn van een 'deterministische aanpak' waarbij kansen en onzekerheden geen rol spelen. Echter bij de overschrijdingskansbenadering spelen precies dezelfde onzekerheden een rol als bij de overstromingskansbenadering. Door op een andere manier met onzekerheden om te gaan, gaan ze namelijk niet weg.

De onzekerheden ten aanzien van de belastingen en de sterkte-eigenschappen worden binnen de overschrijdingskansbenadering afgedekt door middel van karakteristieke waarden en veiligheidsfactoren. Dergelijke karakteristieke waarden en veiligheidsfactoren worden idealiter zodanig gekozen dat de kans op een dijkdoorbraak voldoende klein is als uit het toetsvoorschrift het oordeel 'voldoet' volgt. Hieruit blijkt wel dat de overschrijdingskansbenadering en de overstromingskansbenadering, nauw met elkaar zijn verbonden. Bij de overstromingskansbenadering wordt gekeken naar de kans dat de belasting groter is dan de sterkte. Bij de overschrijdingskansbenadering wordt gekeken of de rekenwaarde van de belasting groter is dan de rekenwaarde van de sterkte. Een rekenwaarde is een karakteristieke waarde, eventueel na toepassing van een veiligheidsfactor.

Bij het beschermen van het achterland zou de norm de kans beschrijven dat een gebied overstroomt als gevolg van een doorbraak in een regionale kering. Deze overstromingskans geldt dan voor de gehele kering die het gebied beschermt. Vervolgens is het de vraag hoe deze norm vertaald moet worden naar een bijbehorende overschrijdingskansnorm waarbij zaken als lengte-effect (zie paragraaf 3.4) en verdeling over mechanismen vooraf vastgelegd en verdisconteerd moeten worden. Zie onderstaande figuur voor de samenhang tussen het te beschermen gebied, de bijbehorende norm als overstromingskans en de afleiding naar een normoverschrijdingskans.



Indien bij de overstroomingskans gebleven wordt is de verdiscontering van het lengte-effect en de verdeling over de faalmechanismen vooraf niet nodig maar wordt dit meegenomen in de bepaling van de overstroomingskans.

Het voordeel van het vooraf verdisconteren is dat het eenvoudiger wordt om mee te werken omdat er met standaardwaarden wordt gewerkt, het nadeel is echter dat het een relatief conservatieve benadering is omdat deze verdeling voor het merendeel van de waterkeringen geldig moet zijn. Daarnaast zijn maatwerkoplossingen in deze aanpak beperkt mogelijk.

In de huidige werkwijze van de normering van de regionale kering is verondersteld dat de factor tussen de overstroomingskans en de overschrijdingskans een factor 0,2 is. De overstroomingskans die hoort bij de huidige overschrijdingsfrequentie is daarmee een factor 5 kleiner. Belangrijke vraag hierbij is of deze factor 0,2 nog correct is. De relatie tussen de huidige overschrijdingskans en de bijbehorende overstroomingskans zou in beeld moeten worden gebracht om indien nodig goed onderbouwd terug te kunnen stappen van de overschrijdingskans naar de overstroomingskans. Dit heeft als voordeel dat de overschrijdingskans de basis kan vormen maar dat in het geval van maatwerk er terug gestapt kan worden naar de overstroomingskans en dat een eventueel uit te voeren kosten-batenanalyse in goed perspectief van de geldende norm gezet kan worden.

Een nader uit te werken aandachtspunt voor de regionale keringen is het verdisconteren van het lengte-effect en de verdeling over de mechanismen.

Het lengte-effect (bron: VNK2 Methode nader verklaard)

Hoe langer een waterkering, des te groter de kans dat zich ergens een zwakke plek bevindt. Een dijkwachter die tijdens hoogwater over een geometrisch uniforme dijk loopt, heeft bij elke stap een kans om een gevaarlijke situatie waar te nemen. De ondergrond is de dijkwachter immers onbekend. Hoe groter de afstand die de dijkwachter aflegt, des te groter de kans is dat hij of zij ergens een probleem aantreft. Het lengte-effect is niet voor alle faalmechanismen gelijk, ook al is de waterstand bij alle faalmechanismen de drijvende kracht. Dat klinkt wellicht vreemd, maar is direct te relateren aan de praktijk. Dijkwachters die een dijk tijdens hoogwater controleren op overloop hoeven waarschijnlijk niet ver te lopen om een goed oordeel te kunnen vellen over de kans dat de dijk ergens wordt overstroomd. Immers, als de dijk ergens overstroomt, dan is dat verderop waarschijnlijk ook het geval, en vice versa of het laagste punt is bekend en daar stroomt het als eerste overheen.. Dit komt omdat de hoogte van een waterkering een zeer kleine ruimtelijke spreiding kent. De ruimtelijke spreiding van de weerstand van de dijk tegen het faalmechanisme macrostabiliteit en opbarsten en piping is echter relatief groot: de eigenschappen van de ondergrond kunnen elke 100 meter anders zijn. Hoe groter de afstand die de dijkwachters afleggen, des te groter de kans dat ze ergens een wel zullen aantreffen. De kans op geotechnische problemen is langs de totale dijkkring dus groter dan de kans dat dit faalmechanisme zich in een willekeurige dijkstrekking met een lengte van

In de huidige systematiek van toetsen en ontwerpen van regionale waterkeringen zijn daarin keuzes en aannames gedaan rondom het verdisconteren van lengte-effect. Gegeven de ontwikkeling van kennis rondom het lengte-effect is het de vraag hoe deze keuzes en aannames zich verhouden tot deze kennisontwikkeling. In relatie tot de huidige werkwijze gaat het om de keuze tussen een norm op dijkvak versus een norm op dijkkring/dijktraject benadering. Deze keuze kan worden heroverwogen inclusief de bijbehorende uitwerking van het lengte-effect.

Het verdisconteren van het lengte-effect dient nader uitgezocht te worden en staat los van de keuze voor een overschrijdingskans of een overstroomingskans omdat in beide gevallen dit verwerkt moet worden.

In de huidige definities van de overschrijdingskans en overstromingskans zijn de faaldefinities niet gelijk. Bij de overschrijdingskans wordt gesteld dat schade aan de kering of vervormingen mogen optreden tot het niveau dat water nog steeds gekeerd kan worden. Deze schade en kleine vervormingen leiden nog niet tot een overstroming. Met deze definitie wordt een overstroming voorkomen, echter zit men nog ver af van de daadwerkelijke kans op een overstroming.

Bij de overstromingskans wordt gesteld dat vervormingen en schades moeten optreden die leiden tot het falen van de waterkering. Dit betekent dat er grotere vervormingen of afschuivingen moeten optreden of grote schade aan de bekleding zodat een overstroming te verwachten is.

Deze faaldefinities zijn belangrijk omdat het een belangrijke link is met wat de norm precies moet beschrijven. Als de norm een kans op een overstroming beschrijft moeten de faaldefinities daar ook bij passen (grote schade en grote vervormingen). Beschrijft de norm schade aan de waterkering dan passen daar andere faaldefinities bij (geen/kleine schade en kleine vervormingen).

Bovenstaande verschil in faaldefinitie staat los van de keuze voor de overschrijdingskans of overstromingskans. Dit omdat de overschrijdingskans een afgeleide is van de overstromingskans. Afhankelijk van de keuze wat de norm dient te beschrijven volgen daar eisen uit.

Primaire keringen

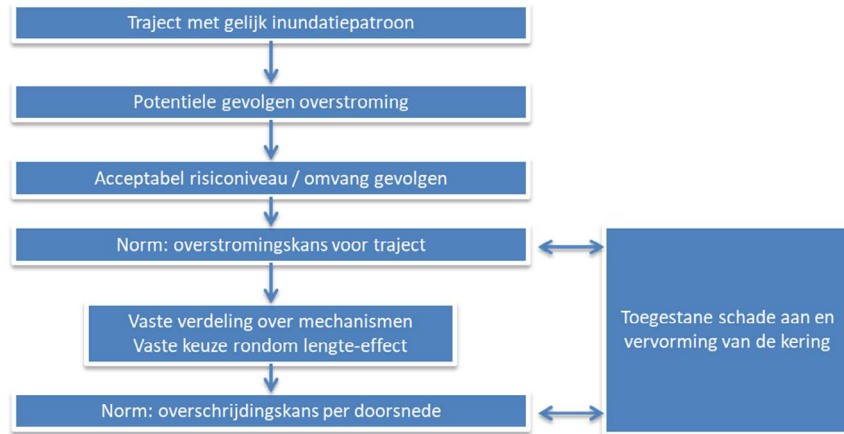
Voor de primaire keringen is overgestapt op de overstromingskans waarbij de kans ook daadwerkelijk de kans beschrijft dat een overstroming kan optreden.

In de uitwerking hoe aan deze norm getoetst en hoe ermee ontworpen kan worden is het dan ook nodig om qua faaldefinitie aan te sluiten bij het daadwerkelijk falen van de kering. Dit betekent grotere schade aan de bekleding, grotere overslagdebieten en grotere vervormingen/afschuiven van de waterkering.

Om de beoordelingen en ontwerpen te vereenvoudigen is ook voor de primaire keringen de overstromingskans vertaald naar een overschrijdingskans. Hierbij zijn vaste verdelingen over de mechanismen vastgesteld en keuzes gemaakt hoe om te gaan met het lengte-effect. Belangrijk is wel dat de faaldefinities niet veranderen. Ook bij de overschrijdingskans moet dan rekening worden gehouden met de grotere schade en vervormingen.

De norm voor de primaire keringen is dan nu wel een overstromingskans maar de huidige werkwijze van beoordelen en ontwerpen is meer gebaseerd op de overschrijdingskans.

In onderstaande figuur is weergegeven hoe de verschillende aspecten samenhangen. Vanuit de wens wat de norm moet beschrijven, worden de verschillende vertalingen gemaakt die nog steeds direct aansluiten bij het oorspronkelijke doel. Ongeacht de keuze voor een overschrijdingskans of overstromingskans moet onderstaande samenhang inzichtelijk worden gemaakt.



3.5 Modellen en methoden

Om te bepalen of aan de norm (overschrijdingskans of overstromingskans) wordt voldaan zijn er methoden en modellen beschikbaar. Deze twee zijn niet direct aan elkaar gelinkt. Een overstap op een ander type norm betekent niet direct dat er ook moet worden overgestapt op andere modellen of methoden.

Indien voor de regionale keringen wordt overgestapt op een overstromingskans is het een keuze om bij de huidige modellen en methoden te blijven of over te stappen op nieuwe modellen.

Voor de primaire keringen is er voor gekozen om naast de overstap op de overstromingskans ook direct over te stappen op een nieuw sterktemodel voor stabiliteit (naast gedraineerd ook ongedraineerd). Dit nieuwe model vraagt andere en meer gedetailleerde gegevens die allemaal opnieuw verzameld moesten worden. Dit heeft echter niet direct iets met de nieuwe norm te maken maar met een keuze om over te stappen op een geavanceerdere rekenwijze voor stabiliteit. In het kader van de overstromingskans kan met beide modellen gewerkt worden alleen het ongedraineerd rekenen biedt meer mogelijkheden en geeft een scherper beeld van sterkte van de kering. Dit wil echter niet zeggen dat het voor regionale keringen direct gunstiger wordt omdat de onzekerheden bij regionale keringen mogelijk groter zijn.

Indien voor de regionale keringen bij het huidige sterktemodel wordt gebleven kunnen de huidig beschikbare gegevens gebruikt worden en zal dit niet direct tot extra werk leiden.



3.6 Relatie met beheer

De relatie met het dagelijks beheer is een belangrijk punt. Bij het meer centraal zetten van het falen van de kering, de kans op het optreden van een overstrooming, gaat dit gepaard met faaldefinities die ook tot falen leiden. Dit betekent grote overslagdebieten en grote vervormingen van de kering. Echter voor beheer zijn kleine oppervlakkige vervormingen ook belangrijk, daar horen dan echter andere eisen bij. Het gaat hier dan om de relatie tussen de kans op een overstrooming (uiterste grenstoestand) en de kans op schade aan de kering (bruikbaarheidsgrenstoestand), dit zijn twee verschillende zaken die wel bij elkaar horen maar niet hetzelfde zijn. In een notendop: de norm voor de veiligheid heeft een kleine kans van optreden met grote vervormingen en grote overslagdebieten met doorbraak als gevolg en de norm voor beheer heeft een relatief grote kans met daarbij kleine vervormingen (oppervlakkige glijcirkels) en weinig overslag die aantonen dat de kans op schade klein genoeg is.



Aansluiting huidige werkwijze

De huidige werkwijze van de regionale waterkeringen is ingericht op basis van een overschrijdingskans norm waar met relatief strenge eisen aan vervormingen en schades wordt bepaald of een kering voldoet.

De aanpak rondom de overschrijdingskans en het vooraf verdisconteren van verdeling over mechanismen en lengte-effect staat een overstap naar een overstromingskans niet in de weg omdat vanuit de overstromingskans een vertaling gemaakt kan worden naar de overschrijdingskans werkwijze. Echter conservatieve keuzes op landelijk niveau is ondoelmatig op lokaal niveau. Maar omdat de link met de overstromingskans direct is gelegd kan er altijd een verfijningstap naar de overstromingskans gemaakt worden om scherper te toetsen of te ontwerpen om de doelmatigheid te vergroten. Binnen de huidige werkwijze is verondersteld dat de factor tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans 0,2 is. Deze zou met de huidige kennis geverifieerd kunnen worden om de relatie tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans sterker te maken.

Door deze relatie explicieter te maken biedt dat de mogelijkheid om bewezen sterkte een plek te geven in het toetsen van de waterkering, wat in de huidige overschrijdingskansbenadering niet mogelijk is. Maar in de gevallen dat het meenemen van bewezen sterkte niet nodig is, kan bij de huidige werkwijze met overschrijdingskans gebreken worden. Om het in de huidige werkpraktijk met de overschrijdingskans wel mogelijk te maken is de Gamma – Beta relatie nodig. Dit wil zeggen dat er een expliciete link gelegd wordt tussen de bijvoorbeeld de stabiliteitsfactor en de faalkans. Voor macrostabiliteit zou dit een invulling zijn van de sterkere relatie tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans.

Een belangrijk verschil met de huidige werkwijze is de definitie van falen. Als de overstap naar de overstromingskans wordt gemaakt, horen daar ook de desbetreffende faaldefinities bij. Ook bij de vertaling naar de overschrijdingskans moet met deze faaldefinities gewerkt worden, anders wordt het toetsen dermate conservatief dat het ondoelmatig wordt.

De link met beheer is een aandachtspunt dat nader uitgewerkt moet worden. Zoals eerder ook al gesteld: de norm voor de veiligheid heeft een kleine kans van optreden met grote vervormingen en grote overslagdebieten met doorbraak als gevolg en de norm voor beheer heeft een relatief grote kans met daarbij kleine vervormingen (oppervlakkige glijcirkels) en weinig overslag die aantonen dat de kans op schade klein genoeg is.

4 Nut en Noodzaak van de overstromingskans

Conclusie van bovenstaande analyse laat zien dat onafhankelijk van de keuze, overschrijdingskansnorm / overstromingskansnorm, er diverse mogelijkheden zijn om de doelmatigheid te vergroten. Het gaat dan met name om een betere onderbouwing en daarmee sterkere relatie tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans (gamma-beta relatie), denk daarbij aan het omgaan met faalkansverdeling, lengte-effect, faaldefinitie. De uiteindelijke keuze wat de norm moet zijn is daarmee van ondergeschikt belang omdat ze direct aan elkaar gelinkt zijn.

Omdat de overschrijdingskans en overstromingskans direct aan elkaar gelinkt zijn is niet zwart wit te zeggen wat de voordelen zijn van de een ten opzichte van de ander. Wel zijn er verschillende voordelen te benoemen die het meer centraal zetten van de overstromingskans rechtvaardigen.

Het meer centraal zetten van de overstromingskans zal de doelmatigheid vergroten en biedt meer mogelijkheden om lokaal te optimaliseren en bijvoorbeeld bewezen sterkte mee te nemen. Daarnaast kan daarmee de kosten-batenanalyse een directere rol spelen in de afwegingen tot investeren. Ook sluit het meer aan bij de aanpak van de primaire keringen en de kansen op wateroverlast vanuit de NBW normering.

Consequentie van de overstromingskans is dat er explicieter moet worden nagedacht welke eisen er vanuit beheer aan de kering worden gesteld en welke vanuit veiligheid. Dit is echter ook al bij de huidige werkwijze een belangrijke vraag.

5 Handelingsperspectief

In voorliggende analyse is met name overzicht gecreëerd van vraagstukken die spelen omtrent de overschrijdingskans en de overstromingskans. Dit om helderheid te geven over hoe ze direct aan elkaar gerelateerd zijn en dat binnen de huidige overschrijdingskansbenadering er diverse mogelijkheden zijn om de overstromingskans meer centraal te zetten.

Om uiteindelijk tot een keuze te komen hoe verder te gaan met de regionale keringen is in dit hoofdstuk een aantal handelingsperspectieven geschetst die opgepakt kunnen worden om de afweging tussen de overstromingskans en de overschrijdingskans beter te onderbouwen en de effecten van keuzes inzichtelijk te maken.

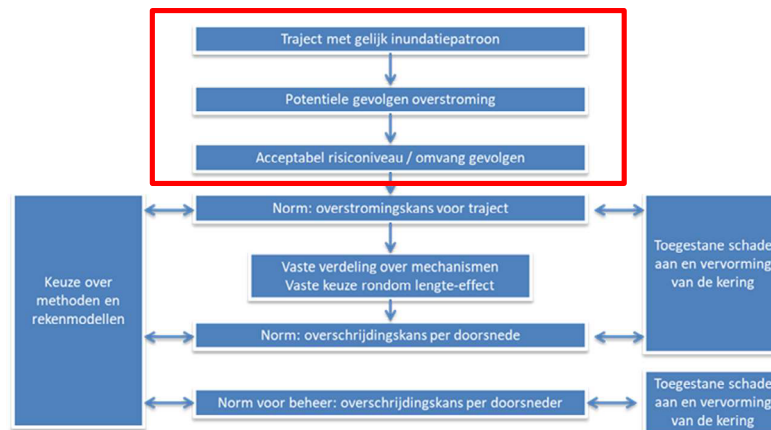
Deze acties zijn nodig om de komende periode scherper te krijgen hoe de afweging tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans gemaakt kan worden en wat de consequenties zijn voor het regionale systeem. Naar verwachting kan met deze inzichten de doelmatigheid van investeringskosten worden vergroot.

- **Belangrijk voor verdere keuzes rondom de regionale keringen is om met elkaar duidelijk te hebben wat het doel is van de norm voor de regionale keringen.** Wat willen we dat de norm beschrijft, wat is de achterliggende gedachte. Hier met elkaar consensus over hebben geeft helderheid over de verdere vertaling naar hoe hier mee om moet worden gegaan in het beheren, toetsen en ontwerpen van de regionale keringen.

De huidige regionale normering met het acceptabele risiconiveau is gebaseerd op onderzoek uit de jaren 80-90. Is dit anno nu nog steeds passend en acceptabel? En hoe ziet de relatie met de schadersicities van de primaire keringen eruit? Dit zijn vragen die ongeacht de keuze overschrijdingskans of overstromingskans inzicht geven in het doel van de norm en hoe de huidige IPO-klassen daar bij passen.

Uit de discussies in het laatste jaar is er ook veel behoefte aan de doelmatigheid van investeringen in regionale keringen. Dit kan worden ingevuld middels een kosten-batenanalyse (KBA). Voor het uitvoeren van een KBA is het nodig om te werken met een overstromingskans. Ook de relatie met de primaire keringen en NBW normering is daarin in een belangrijk onderdeel. Wat zijn daarin de acceptabele risiconiveaus en hoe passen deze op de huidige IPO systematiek.

In de figuur van het totale systeem gaat het in deze stap met name om het rood omkaderde deel, wat vervolgens vertaald moet worden naar een norm. Dat kan zowel een overschrijdingskans als overstromingskans zijn.



- Om een goede invulling te geven aan de KBA is het nodig de overstromingskans een bepaalde plek te geven in het systeem van regionale keringen. Hierbij is het niet direct nodig om dan ook over te stappen op een overstromingskansnorm. Er kan vanuit de overstromingskans een vertaling worden gemaakt naar de overschrijdingskans. Door deze relatie sterker te maken of explicieter te maken kan de KBA direct gekoppeld worden aan een eventuele overschrijdingskansnorm.

Het is nodig de relatie tussen de overstromingskans en de overschrijdingskans te gaan leggen, deze relatie is momenteel niet aanwezig of niet voldoende onderbouwd. Er is een kalibratie nodig tussen de faalkans(eisen) (overstromingskansbenadering) en veiligheidsfactoren die horen bij de overschrijdingskansbenadering, de Beta-Gamma relatie.

Hiermee kan dan een vertaling worden gemaakt van de overstromingskans naar de overschrijdingskans. Ook is deze relatie nodig om het werken met bewezen sterkte mogelijk te maken. In onderstaande figuur gaat dat met name over het rood omkaderde deel.



- De vertaling van een traject naar een doorsnede heeft in de huidige werkwijze voor regionale keringen geen plek. Nu hebben een lange en een korte kering die een bepaalde waarde beschermen dezelfde norm en daarmee ook dezelfde doorsnede-eisen onafhankelijk van de lengte waarop de norm van toepassing is. Hierbij dient ook aandacht te zijn voor positieve systeemwerking.

De keuzes rondom verdiscontering van het lengte-effect dient voor de regionale keringen explicieter te worden gemaakt.

Kijkend naar de huidige werkwijze bij de primaire keringen rondom het lengte-effect lijkt dit mogelijk conservatief. Zeker voor gebieden met een gereguleerd watersysteem is nader onderzoek naar de wijze van verdiscontering van het lengte-effect nodig. Dit om onnodig strenge eisen op doorsnedeniveau te voorkomen. In onderstaande figuur gaat dat met name over het rood omkaderde deel, maar heeft uiteraard wel raakvlakken met de andere onderdelen.



- In de huidige sterktemodellering voor regionale keringen wordt gewerkt met sterktemodellen met effectieve parameters en andere proeftypen en proefprocedures. Voor de primaire keringen wordt sinds WBI2017 gewerkt met nieuwe sterktemodellen die zowel effectieve als ongedraineerde parameters kunnen bevatten welke zijn gebaseerd op andere proeftypen en proefprocedures. Deze nieuwe werkwijze biedt uitgebreidere mogelijkheden voor het doorrekenen van de sterkte van de kering. Echter voor het gebruik bij regionale keringen is veel nieuwe informatie nodig en ontstaan ook nieuwe kennislacunes door de aard van de regionale keringen. Het beeld is wel dat, indien voldoende gegevens beschikbaar zijn, deze nieuwe sterkte-modellen een scherper beeld van het grondgedrag kunnen geven. Indien ook de kennislacunes kunnen worden ingevuld zal dit leiden tot een aanscherping van het veiligheidsbeeld, dit kan in zowel positieve als negatieve zin.

Om de kalibratie voor de sterkte van de regionale keringen goed vorm te kunnen geven kan voor de korte termijn een beta-gamma relatie gemaakt kunnen worden voor de modellen met effectieve parameters en oude proeftypen en proefprocedures. Parallel daaraan is het verstandig om ook een beta-gamma relatie te leggen voor de nieuwe modellen die zowel met effectieve als ongedraineerde parameters kunnen rekenen. Voor beide situatie kan dan in een aantal pilots worden onderzocht wat de belangrijkste onderdelen zijn en wat dat betekent.

Dit sluit aan bij de reeds uitgevoerde analyse uitgevoerd door Arcadis over de Beta-Gamma relatie voor ongedraineerd rekenen.

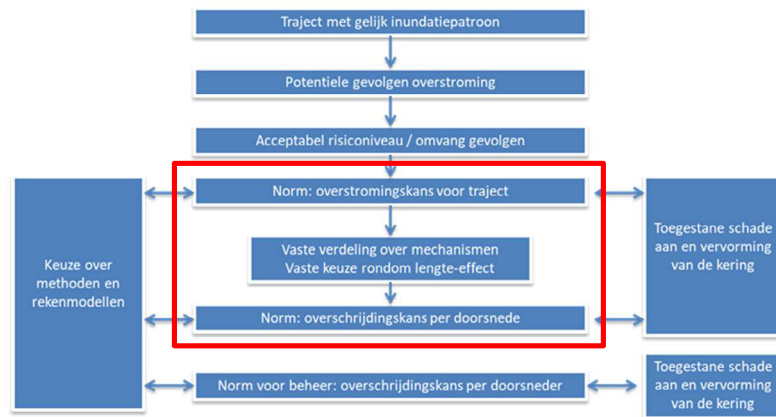
In onderstaande figuur gaat dat met name over het rood omkaderde deel, maar heeft uiteraard wel raakvlakken met de andere onderdelen.



- Zolang de Beta-Gamma relatie nog niet beschikbaar is kan de relatie tussen de overschrijdingskans en de overstromingskans sterker worden door middel van het werken met scenario's. Dit kan ook binnen de huidige werkwijze en is een goede eerste stap om explicieter om te gaan met onzekerheden zonder direct uit te gaan van één conservatief scenario. Deze scenario's kunnen bijvoorbeeld bestaan uit verschillende belastingscenario's die met een bepaalde kans van optreden voor kunnen komen. Denk hierbij aan scenario's met verschillende optredende freatische lijnen. Hierdoor wordt een scherper beeld van de kering verkregen, wat de doelmatigheid kan vergroten. Dit is momenteel eenvoudig uitgewerkt voor de casus A5H vanuit Waterschap Rivierenland.

De aanpak van het werken met scenario's dient verder uitgewerkt te worden op basis van meerdere cases, dit kan ook direct worden gekoppeld aan de pilots voor het afleiden van de Beta-Gamma relaties. Dit zal tot een scherper beeld van de veiligheid leiden wat er vervolgens toe zal leiden dat de doelmatigheid van investeringen wordt vergroot.

In onderstaande figuur gaat dat met name over het rood omkaderde deel, maar heeft uiteraard wel raakvlakken met de andere onderdelen.



- Er zitten verschillen tussen typen regionale keringen, bijvoorbeeld tussen gebieden met een gereguleerd waterpeil en systemen die middels een afvoergolf belast worden. Dit verschil kan zich uiten in de wijze waarop de kritieke situatie eruit ziet en of de ondergrond gedraineerd of ongedraineerd wordt belast. Voor gebieden met een gereguleerd peil is de buitenwaterstand vaak van ondergeschikt belang. De mate van verzadiging van de dijk (ligging freatische lijn) en de verkeersbelasting zijn de dominante factoren. De ontwikkeling van de veiligheidsbenadering vergt daarom per type regionale kering mogelijk een iets andere uitwerking. Denk daarbij aan de volgende verschillende typen regionale keringen:
 - Voorlandkeringen, deze keren buitenwater en hebben een overeenkomst met primaire keringen
 - Waterkeringen langs boezemwater, deze keren vaak waterstanden met kleine verschillen tussen de verschillende overschrijdingskansen.
 - Waterkeringen langs regionale rivieren, deze lijken wat betreft de overschrijdingskansen van waterstanden meer op buitenwater dan op boezemwater.
 - Compartimenteringskeringen, dit is een apart type kering die mogelijk getalsmatige eerder in de vorm van een conditionele faalkans moet worden uitgedrukt, net zoals bij de Diefdijk.

In onderstaande figuur gaat dat met name over het rood omkaderde deel, maar heeft uiteraard wel raakvlakken met de andere onderdelen.



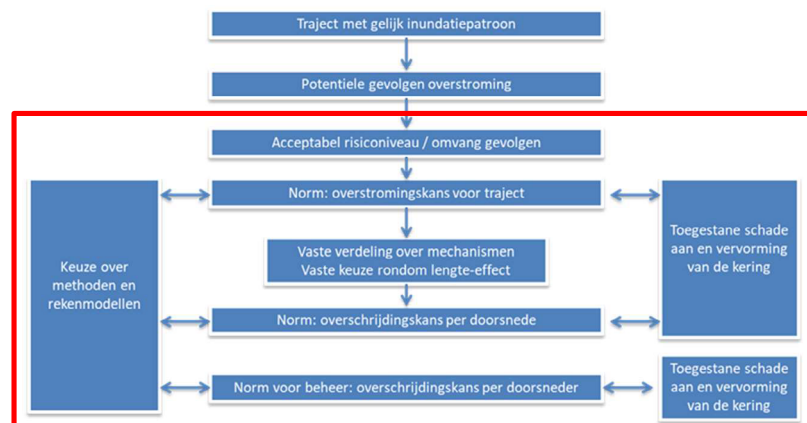
- Bij het meer centraal stellen van de overstromingskans is het belangrijk de relatie met beheer & onderhoud duidelijk te leggen. Zeker als de norm daadwerkelijk de kans op een overstroming beschrijft dan is het in de situatie met een relatief soepele norm belangrijk dat de eisen van B&O scherp zijn. Het zou er toe kunnen leiden dat de eisen vanuit beheer leidend gaan zijn in de eisen aan de kering.

Uitgezocht dient te worden hoe eisen vanuit beheer zich verhouden tot eisen vanuit veiligheid.

Veiligheid heeft een relatief kleine kans van optreden met grote vervormingen die leiden tot een overstroming en beheer heeft een relatief grote kans met daarbij kleine vervormingen waarbij de kans op schade klein genoeg is.

Deze twee benaderingen dienen kwantitatief verder uitgewerkt te worden om aan te geven welke leidend is in de eisen aan de kering en om ondoelmatigheid te voorkomen (strenge eis met kleine vervormingen).

In onderstaande figuur gaat dat met name over het rood omkaderde deel, maar heeft uiteraard wel raakvlakken met de andere onderdelen.



Waterveiligheid - Regionale Keringen

De waterkeringbeheerders en provincies, die samen met de Stowa het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen (ORK) uitvoeren, hebben een verkenning uitgevoerd naar de mogelijke impact van het falen van regionale waterkeringen op de LIR en maatschappelijke ontwrichting.

Conform de verwachting laten de resultaten van de globale verkenning zien dat dit maar op een beperkt aantal locaties, en maar in beperkte mate, aan de orde is.

In het Ontwikkelprogramma Regionale keringen gaan provincies en waterkeringbeheerders, in overeenstemming met de Visie op regionale waterkeringen, aan de slag met de nadere verkenning van de overstromingsrisicobenadering.

Achtergrondinformatie:

Naar aanleiding van een memo van het Hoogheemraadschap van Rijnland aan de Deltacommissaris, besproken tijdens een werkbezoek in oktober, is in de Stuurgroep Deltaprogramma van 8 december de bijdrage van regionale keringen aan overstromingsrisico's aan de orde geweest.

Er bleek behoefte aan informatie over regionale waterkeringen waarvan het falen tot onaanvaardbare waarden van het LIR (Lokaal Individueel Risico) zou kunnen leiden. Daarmee zou immers de landelijke basisveiligheid in geding zijn (ook als de primaire waterkeringen op orde zijn). Een tweede vraag was of er regionale waterkeringen zijn waarvan het falen tot substantiële schade aan vitale en kwetsbare infrastructuur kan leiden, met bovenregionale of landelijke maatschappelijke ontwrichting tot gevolg.

De waterkeringbeheerders en provincies, die samen met de Stowa het Ontwikkelingsprogramma Regionale Keringen ORK uitvoeren, hebben deze vragen opgepakt. Er is een eerste verkenning uitgevoerd onder de waterkeringbeheerders. Hieruit blijkt dat er alleen op enkele specifieke locaties, onder meer Schiphol, aandachtsgebieden zijn. Deze gebieden zijn, vergeleken met de primaire keringen, kleinschalig van aard. Het aantal plaatsen waar het falen van een regionale kering kan leiden tot onacceptabele bovenregionale schade aan vitale infrastructuur is eveneens beperkt.

De resultaten van de globale verkenning laten zien dat dit maar op een beperkt aantal locaties en maar in beperkte mate aan de orde is. In het kader van het ORK programma gaan provincies en waterkeringbeheerders aan de slag met de nadere verkenning van de overstromingsrisicobenadering.

Daarbij kunnen de locaties dienen als onderzoekspilots. Ook zal aandacht worden besteed aan de methodiek waarmee de overstromingsrisico's in beeld worden gebracht. Uiteraard maken we daarbij waar mogelijk gebruik van beschikbare informatie van beheerders en kennis die al is opgedaan voor de primaire keringen. De resultaten van de pilots vormen bouwstenen om de verdere discussie over een risicobenadering voor regionale keringen te kunnen voeren.

Vraag 1			Vraag 2		
	Zijn er in uw gebied regionale waterkeringen waarvan u verwacht dat het falen van deze keringen dusdanige gevolgen heeft dat het LIR (Lokaal individueel Risico) onaanvaardbare waarden zou kunnen aannemen m.a.w. dat de landelijke basisveiligheid in het gedrang komt.		Zijn er in uw gebied regionale waterkeringen waarvan u verwacht dat er bij falen substantiële schade aan vitale en kwetsbare infrastructuur kan optreden, die leidt tot een bovenregionale of landelijke maatschappelijke ontwrichting ?		
	Antwoord	Interpretatie	Antwoord	Interpretatie	
Hunze en Aa's	Ja	LIR (slachtoffers m.n. in Winschoten) . Noemwn verhoogd	Ja	ontwrichting voor Nederland (Gasrotonde etc)	Samen met de Provincies Groningen en Drenthe en ws Noorderzijlvest is er een studie naar deze keringen uitgevoerd (Droge Voeten 2050, contactpersoon Provincie Groningen is Huub Schuurman) en zijn aan aantal kering trajecten met 1:300 en 1:1000 genormeerd.
De Dommel	Nee	Wij hebben geen regionale keringen in ons gebied die bij falen slachtoffers eisen.	Nee		
Limburg	Nee	Nee	Nee	Nee	
Waterschap DOD	Nee	Zwolle-zuid is een dicht bevolkt gebied met veel bedrijvigheid. Er is geen onderzoek uitgevoerd om te bepalen wat het LIR op basis van een overstroming vanuit het regionaal systeem. De verwachting is dat er niet veel slachtoffers zullen vallen.	Nee	Overstroming van Zwolle-zuid zou veel schade opleveren (schattingen variëren tussen 0,15 en 1,2 miljard Euro). Bedrijven zouden lange tijd niet kunnen functioneren en woningen zouden lange tijd niet bewoond kunnen worden.	
Delfland	Ja	Oud en Nieuw Wateringveldsepolder, Polder Ypenburg?	Ja	Ja, bv 380 KV station, RW A4 (2*), RW A13, Spoor DH-D-R dam, Spoor HVH-R dam, Energie Delft.	
Noorderzijlvest	Ja	Woltersum aan het Eemskanaal . Geen verdere info of onderbouwing	Nee		
Aan en Maas	Ja	Maaspoort	Ja	Onze inschatting is dat overstromingen op bepaalde locaties een grote maatschappelijke impact hebben en soms in een breed perspectief leiden tot maatschappelijke ontwrichting.	
Brabantste Delta	Ja	Terheijden	Ja	Onze inschatting is dat overstromingen op bepaalde locaties een grote maatschappelijke impact hebben en soms in een breed perspectief leiden tot maatschappelijke ontwrichting.	
Rijnland	Ja	Rijnsaterwoudsepolder, Aalsmeer	Ja	Schiphol, A4, A44	https://www.h2owaternetwerk.nl/index.php/vakartikele/p/428-is-het-nog-wel-nodig-regionale-dijkversterkingen-in-de-21ste-eeuw
Waternet	Nee	Aandachtsgebieden liggen in landelijk gebied (klasse III)	Nee	Nee, Uit de uitgevoerde globale inventarisatie komt het beeld naar voren dat een wezenlijk deel van de vitale en kwetsbare functies zich in het beheergebied van AGV bevindt in polders met de strengste veiligheidsklasse of in gebieden waarvoor de kans op overstromen vanuit de boezemwateren verwaarloosbaar klein is.	
Hollands Noorderkwartier	Ja?	Nader onderzoek nodig	Ja?	Nader onderzoek nodig	
Vechtstromen	Nee	Hooguit kanalen Coevorden	Nee	Lastig in te schatten	
Rijn en IJssel	Ja	Tuindorp nee. Rijstrangen: ja. Eefse beek: nee. Afdelingskanaal Berkel: nee. Kanaal van Hackfort: ja	Ja	Tuindorp nee. Rijstrangen: ja. Eefse beek: nee. Afdelingskanaal Berkel: nee. Kanaal van Hackfort: nee	
Schieland en Krimpenerwaard	Nee		Ja		
Scheidestromen	Nee		Nee	Vliegveld Zestienhoven. Bezig met 3Di doorrekening regionale keringen nog niet genormeerd.	
Wetterskip Fryslan	Nee		Mogelijk	Onderzoek loopt	
Zuiderzeeland	Nee		Nee		
Vallei en Veluwe	Nee		Nee	Lastig te duiden. Rekening houden met risicobenadering bij regionale keringen	
Hollandse Delta					
Rivierenland	Nee		Ja	Snelwegen en Betuweroute mogelijk	
Sliedrecht	Nee				
Rijnlanden	Nee		Ja	?	
Rijkswaterstaat	Nee		Nee		

Aantekeningen/Kanttekeningen
HIS-SSM vs Waterschade schatter

Op twee plekken wordt een schade van 1 miljard euro berekend namelijk bij de luchthaven Schiphol en bij het knooppunt Burgerveen (A4 –A44). In het laatste geval heeft dit mogelijk te maken met de relatief lage ligging van de A4 en de spoorbaan die onder de A44 doorgaan. Voor Schiphol zullen de kosten waarschijnlijk hoger uitpakken omdat de indirecte schade zoals imagoschade, schade luchthavenmaatschappijen, en de impact op de Nederlandse economie niet zijn meegenomen. Vermoedelijk is de berekende schade van een miljard euro voor Schiphol de ondergrens.

Het beschouwen van een basisbeschermingsniveau voor boezemkaden zou technisch gezien pas meerwaarde hebben als dit gepaard gaat met een gelijktijdige overstap van een overschrijdingskansbenadering naar een overstromingskansbenadering (net zoals dat eerder al voor primaire waterkeringen is gebeurd). Dat vergt naar verwachting een lang 'ingroeitraject'.

Het basisbeschermingsniveau ('LIR') is uitsluitend geformuleerd voor de nommering van de primaire waterkeringen en heeft geen juridische doorwerking voor wat betreft de nommering van de regionale waterkeringen.

Allereerst is deze reactie niet bestuurlijk afgestemd en daarmee mogelijk ook niet representatief voor een bestuurlijke reactie. Daarnaast willen wij uw aandacht vragen voor een zorgvuldige communicatiestrategie. Deze verkenning (en de antwoorden op de vragen) kan zorgen voor grote ongerustheid bij onze ingelanden.

Verder zouden wij graag zien dat de provincies en Rijkswaterstaat worden betrokken in de studie. De provincies zijn immers normstellend voor de regionale keringen en Rijkswaterstaat is keringbeheerder en normstellend voor de regionale rijkskeringen.

Het is nog onduidelijk wat de UWV en IPO, via STOWA, met de door ons verstrekte gegevens gaan doen. Uit uw brief blijkt dat u voornemens bent om over de uitkomsten van uitvraag te rapporteren aan de landelijke stuurgroep Deltaprogramma, waar zou worden bezien welke vervolgstappen noodzakelijk zijn. Wij stellen dan ook voor om de stuurgroep DP hooguit te informeren over de resultaten van de uitvraag en eventuele vervolgstappen vanuit het onderzoeksprogramma van het ORK, mede gezien het feit dat het om een bestuurlijk gevoelig traject gaat, vooraf af te stemmen met de bestuurlijke gremia van waterschappen en provincies. Daarnaast is het van belang om vooraf inzicht te hebben in het beroep dat een vervolg doet op de personele capaciteit.