



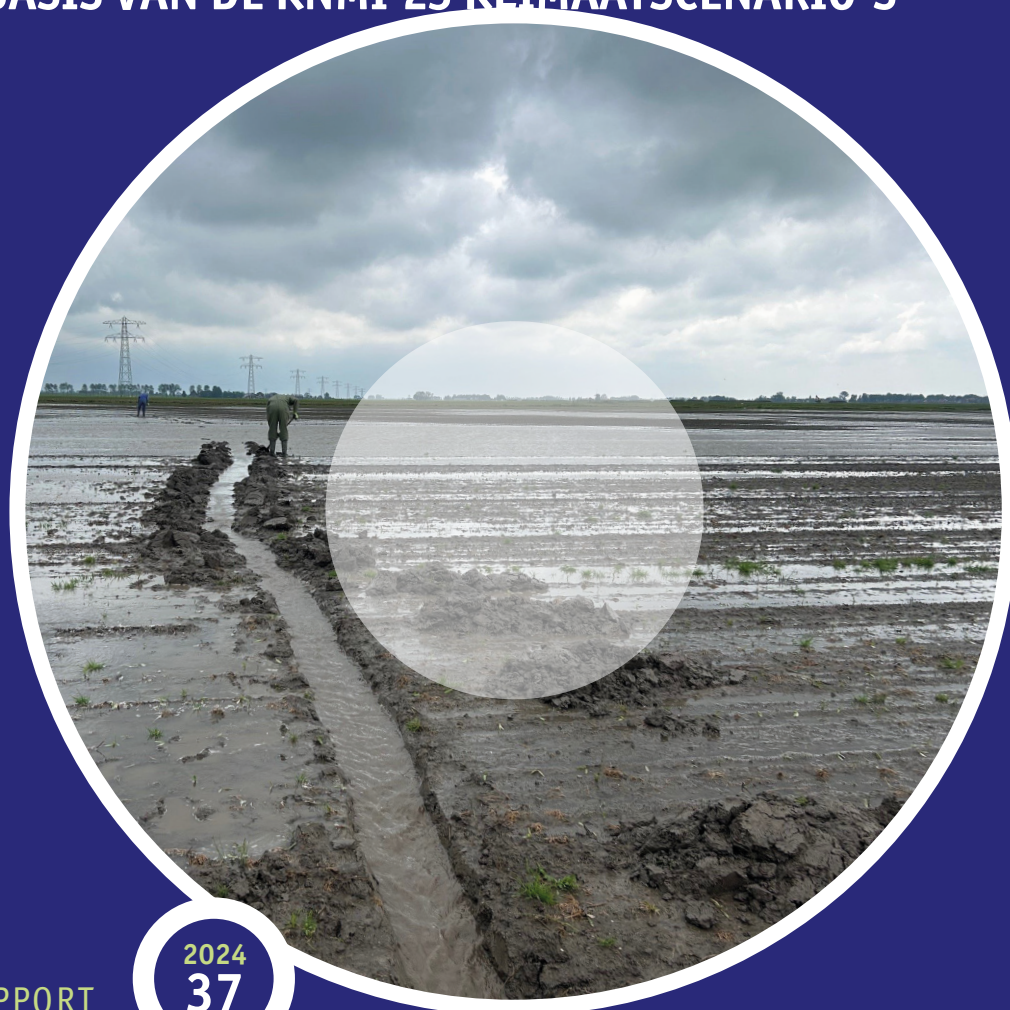
Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

HKV
LIJN IN WATER

stowa

NEERSLAGSTATISTIEK KNMI'23

NEERSLAGSTATISTIEK, -REEKSEN EN -GEBEURTENISSEN
OP BASIS VAN DE KNMI'23 KLIMAATSCENARIO'S



RAPPORT

2024
37

NEERSLAGSTATISTIEK KNMI'23

NEERSLAGSTATISTIEK, -REEKSEN EN -GEBEURTENISSEN
OP BASIS VAN DE KNMI'23 KLIMAATSCENARIO'S

RAPPORT

2024

37

ISBN 978.94.6479.075.7



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Robin Nicolai, HKV Lijn in Water
Nils van der Vliet, HKV Lijn in Water
Dorien Lugt, HKV Lijn in Water

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Michelle Talsma, STOWA
Frank van der Bolt, Waterschap Aa en Maas
Matthijs van den Brink, Rijkswaterstaat
Jochem Fritz, HH Delfland
Joost Heijkers, HH de Stichtse Rijnlanden
Jeroen Hermans HH Noorderkwartier
Helena Pavelkova, Waterschaplimburg
Jannes Schenkel, Waterschap Noorderzijlvest.nl
Rudolph Versteeg, Waterschap Zuiderzeeland.nl
Frank Weerts, Waterschap Rivierenland

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2024-37
ISBN 978.94.6479.075.7

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.

SAMENVATTING

In oktober 2023 zijn de KNMI'23 klimaatscenario's uitgekomen. Deze scenario's presenteren de nieuwste inzichten met betrekking tot een mogelijk toekomstig klimaat voor Nederland. Deze scenario's zijn gebaseerd op de IPCC scenario's van de Verenigde Naties, maar zijn een vertaling van de wereldwijde scenario's voor Nederland. De KNMI'23-scenario's vervangen de KNMI'14-scenario's. De KNMI'23-klimaatscenario's zullen de komende jaren de basis vormen voor onderzoek naar de effecten van klimaatverandering en klimaatadaptatie in Nederland.

Waterbeheerders gebruiken neerslagstatistiek, neerslagreeksen en neerslaggebeurtenissen om systemen of maatregelen te toetsen. Zij hebben ook voor het toekomstig klimaat behoefte aan statistiek en reeksen afgeleid voor verschillende klimaatscenario's. Deze informatie zit niet expliciet in de KNMI'23-klimaatscenario's. Voor het waterbeheer is daarom een vertaalslag gemaakt naar neerslagstatistiek per scenario en zichtjaar voor alle duren en herhalingstijden. Daarnaast zijn langjarige neerslag- en verdampingsreeksen gegenereerd die representatief zijn voor de KNMI'23 scenario's. Deze kunnen bijvoorbeeld worden gebruikt voor tijdreeksanalyses van watersystemen. Ook zijn de gebeurtenissen voor stedelijk gebied, op basis van 10-minutengegevens, getransformeerd zodat deze representatief zijn voor de toekomststatistiek. Dit rapport beschrijft de totstandkoming van deze producten. Tot slot presenteert het rapport een verkennende analyse naar het voorkomen van grootschalige neerslaggebeurtenissen zoals die in juli 2021 in de simulaties met het klimaatmodel van het KNMI. Die grootschalige gebeurtenissen zijn relevant omdat het Nederlandse waterbeheer de gebeurtenis van juli 2021 als uitgangspunt gebruikt bij het uitvoeren van de bovenregionale stresstesten.

Het KNMI heeft drie scenario's voor de uitstoot van broeikasgassen gedefinieerd: laag, midden en hoog. In alle scenario's zien we een toename van extreme neerslag, waarbij de extremen bij korte duren (tot 24 uur) meer toenemen dan de extremen bij langere duren (vanaf 24 uur). In het lage scenario geldt dat de extremen toenemen tot 2050 en daarna niet verder veranderen. De veranderingen in het midden en hoge scenario blijven tot 2150 doorzetten. Voor de jaarstatistiek zien we in 2150 voor het hoge scenario dat de extremen tot 24 uur met 33% toenemen en voor de lange duren 15%. In het hoge scenario is die toename in 2050 voor duren tot 24 uur ongeveer 7% en voor langere duren 3%. In het lage scenario in 2050 is dat voor alle zichtjaren 2,5% tot 24 uur en iets meer dan 1% voor de langere duren.

We hebben de getallen van de nieuwe statistiek voor het toekomstige klimaat ook vergeleken met die uit STOWA (2019), die op de KNMI'14 scenario's zijn gebaseerd. Daaruit volgt dat de statistiek in voorliggend rapport binnen de bandbreedte van de statistiek in STOWA (2019) blijft. Dat betekent dat de conclusies in dit rapport de conclusies van STOWA (2019) herbevestigen. Binnen die bandbreedte wordt het laagste scenario vrijwel hetzelfde ingeschat. Wel wordt binnen die bandbreedte het hoogste scenario iets lager ingeschat dan in STOWA (2019). Dat verschil is het grootst voor de extremen tot 24 uur. In de praktijk zijn de verschillen tussen de hoge en lage scenario's in de statistiek op basis van KNMI'14 en KNMI'23 klein.

De opzet van de klimaatstatistiek in dit rapport is iets veranderd ten opzichte van de klimaatstatistiek in STOWA (2019). De manier van presenteren is vereenvoudigd, er zijn niet langer boven- en ondergrenzen van statistiek gegeven bij de scenario's. De reden voor deze vereenvoudiging is dat door gebruikers het aantal keuzen in statistiek om mee te rekenen te groot werd gevonden en dat dit de interpretatie van de resultaten moeilijker maakte.

In de praktijk zullen de verschillen tussen analyses met KNMI'14 en KNMI'23 scenario's klein zijn, voor zowel het hoge als het lage scenario. Uiteraard is er wel een verschil voor gebruikers die gebruik maakten van de boven- en ondergrenzen van de scenario's, deze zijn binnen deze studie niet langer bepaald. Wij adviseren gebruikers het lage en het hoge scenario te gebruiken om de bandbreedte van klimaateffecten in beeld te brengen.

Het belangrijkste verschil voor de praktijk is, dat waterbeheerders die in het verleden gebruik maakten van de boven- en ondergrenzen van de scenario's, deze niet langer tot hun beschikking hebben. Wij adviseren gebruikers het lage en het hoge scenario te gebruiken om de bandbreedte van klimaateffecten in beeld te brengen.

Met betrekking tot de gebeurtenis in juli 2021 concluderen we dat dergelijke grootschalige neerslaggebeurtenissen in simulaties voor de klimaatscenario's vaker voorkomen dan in simulaties voor huidig klimaat. Het is niet zeker dat het gebruikte klimaatmodel (RACMO) deze gebeurtenissen realistisch representeert. We bevelen daarom aan het effect van klimaatverandering op deze grootschalige gebeurtenissen nader te onderzoeken.

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 regisseur.

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.

NEERSLAGSTATISTIEK KNMI'23

NEERSLAGSTATISTIEK, -REEKSEN EN -GEBEURTENISSEN OP BASIS VAN DE KNMI'23 KLIMAATSCENARIO'S

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	1
1.3	Achtergrond KNMI'23-klimaatscenario's	1
1.4	Uitgangspunten	3
1.5	Leeswijzer	3
2	NEERSLAGSTATISTIEK KNMI'23	4
2.1	Achtergrond basis- en klimaatstatistiek	4
2.2	Doel en afbakening werkwijze klimaatstatistiek	5
2.3	CPM's: effect van klimaatverandering op subdagelijkse neerslagextremen	6
2.4	Afleiden verandergetallen met RACMO	8
2.4.1	Gefitte GEV-verdelingen	9
2.4.2	Consistente regenduurlijnen	11
2.4.3	Verandergetallen RACMO	15
2.5	Beoordeling en keuzes verandergetallen	16
2.5.1	Schalen met mondiale opwarming	16
2.5.2	RACMO versus CPM's: dagelijkse neerslagsommen	18
2.5.3	Droog en nat	19
2.5.4	Terugkeertijd	21
2.5.5	Duur	22
2.5.6	Beschrijving verandergetallenfunctie en statistiek klimaatscenario's	23
2.5.7	Resulterende neerslagstatistiek	25
2.6	Veranderingen ten opzichte van statistiek uit STOWA 2019-19	30
2.7	Discussie	32
2.8	Conclusies	33

3	NEERSLAG- EN VERDAMPINGSREEKSEN	35
3.1	Neerslagreeksen	35
3.1.1	Verlenging en detrending neerslagreeks	36
3.1.2	Correctie korte duren neerslagreeks	37
3.1.3	Transformatie naar klimaatreeksen neerslag	39
3.2	erdampingsreeksen	39
3.2.1	Detrending temperatuur- en stralingsreeks	39
3.2.2	Beschouwing verdampingsreeks	41
3.2.3	Transformatie naar klimaatreeksen temperatuur- en straling	42
3.2.4	Berekening klimaatreeksen verdamping	42
3.3	Gebruik van de reeksen	42
3.3.1	Klimaatreeksen versus RACMO-reeksen	43
4	NEERSLAGGEBEURTENISSEN STEDELIJK GEBIED	44
5	GROOTSCHALIGE NEERSLAGGEBEURTENISSEN	46
5.1	Inleiding	46
5.2	Analyse	47
5.3	Discussie	51
5.4	Conclusies en aanbevelingen	51
6	REFERENTIES	52
BIJLAGE A	FIGUREN NEERSLAGSTATISTIEK KNMI'23	53

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Op 9 oktober 2023 zijn de KNMI'23-klimaatsscenario's gepubliceerd. Deze scenario's presenteren de nieuwste inzichten met betrekking tot een mogelijk toekomstig klimaat voor Nederland. Deze scenario's zijn gebaseerd op de IPCC scenario's van de Verenigde Naties, maar zijn een vertaling van de wereldwijde scenario's voor Nederland. De KNMI'23-scenario's vervangen de KNMI'14-scenario's. De KNMI'23-klimaatsscenario's zullen de komende jaren de basis vormen voor onderzoek naar de effecten van klimaatverandering en klimaatadaptatie in Nederland.

Waterbeheerders gebruiken neerslagstatistiek, neerslagreeksen en neerslaggebeurtenissen om systemen of maatregelen te toetsen. Ook voor toekomstig klimaat hebben zij behoefte aan actuele statistiek en reeksen afgeleid voor de verschillende klimaatsscenario's. Deze informatie zit niet expliciet in de KNMI'23-klimaatsscenario's; de scenario's bieden alleen enkele kengetallen voor de verandering van neerslag zoals bijvoorbeeld de jaarlijkse totale neerslag, de dagneerslag die eens per 10 jaar wordt overschreden in de zomer en de 10-daagse neerslag die eens per 10 jaar wordt overschreden in de winter. Voor het waterbeheer dient daarom een vertaalslag te worden gemaakt naar neerslagstatistiek per scenario en zichtjaar voor alle uren en herhalings tijden.

1.2 DOEL

Het doel van deze studie is het vertalen van de KNMI'23-klimaatsscenario's naar (i) statistiek van extreme neerslag en (ii) langjarige neerslag- en verdampingsreeksen. Dit rapport beschrijft de totstandkoming van deze twee producten. Daarnaast gaat het rapport in op grootschalige neerslaggebeurtenissen zoals die in juli 2021.

1.3 ACHTERGROND KNMI'23-KLIMAATSCENARIO'S

In de IPCC scenario's wordt gebruik gemaakt van zogenaamde *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP's). Dat zijn scenario's die verschillende mogelijke ontwikkelingen met betrekking tot uitstoot van broeikasgassen en bijbehorende mondiale opwarming presenteren. Binnen het IPCC wordt gebruikt gemaakt van vijf scenario's, waaruit voor het afleiden van KNMI'23-klimaatsscenario's drie zijn geselecteerd, te weten:

- SSP5-8.5, is een hoog scenario en gaat uit van een wereldwijde economische ontwikkeling met toenemend gebruik van fossiele energiebronnen.
- SSP2-4.5, is een midden scenario waarbij vroegere en huidige ontwikkelingen worden geëxtrapoleerd, met inkomenstrends variërend per land en een gemiddelde bevolkingsgroei.
- SSP1-2.6, is een laag scenario en gaat uit van een wereldwijde focus op vermindering van uitstoot van broeikasgassen, conform het Parijsakkoord.

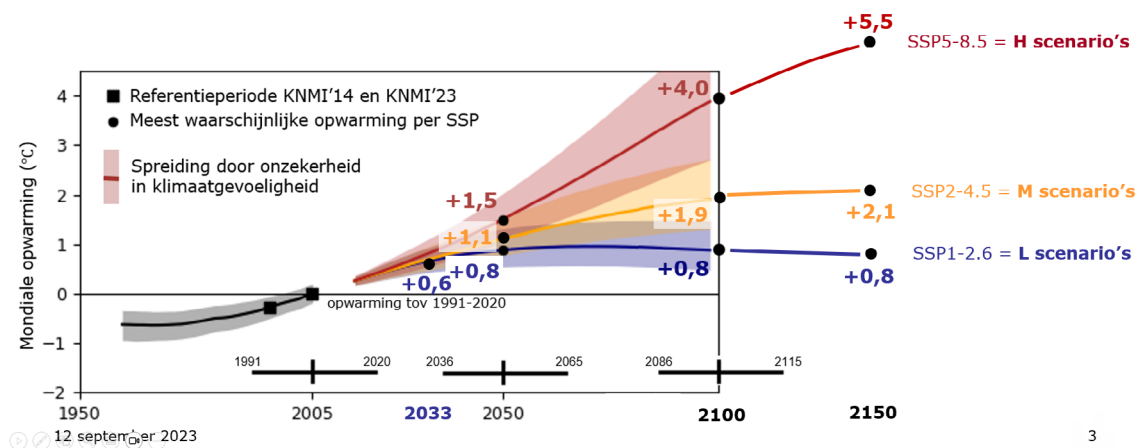
De uitstoot van broeikasgassen wordt aan een verzameling van globale klimaatmodellen opgelegd, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)*. Daaruit volgt een bandbreedte aan wereldwijde temperatuurstijging in verschillende zichtjaren. Figuur 1 geeft deze bandbreedte voor de drie door het KNMI geselecteerde scenario's.

De KNMI'23-klimaatscenario's zijn gebaseerd op deze drie SSP's, hierna aangeduid met L (laag), M (midden¹) en H (hoog), en de zichtjaren 2050, 2100 en 2150. De spreiding in deze scenario's representeert de onzekerheid in de modelprojecties.

Voor ieder SSP is een 'vernattend' en een 'verdrogend' scenario gepresenteerd (n, d). Samen vormen die 18 scenario's, voor drie zichtjaren de scenario's Ln, Ld, Mn, Md, Hn, Hd.

Bovendien is voor zichtjaar 2033 een extra SSP scenario beschouwd dat de afspraak in het Parijs-akkoord representeert die stelt dat de opwarming onder de 1,5°Celsius moet blijven. Daarvoor is geen natte of droge variant geselecteerd, dat vormt een 19^{de} scenario L.

FIGUUR 1 MONDIALE TEMPERAATUURSTIJGING OP BASIS VAN SHARED SOCIOECONOMIC PATHWAYS GEDEFINIEERD DOOR HET IPCC



3

In KNMI (2023) is in Tabel 2.1 te zien dat in het lage scenario de temperatuurstijging per scenario is ingeschat op +0,9 graden Celsius tot 2050, +0,8 graden Celsius tot 2100 en +0,7 graden Celsius in 2150. Deze getallen zijn samengenomen tot +0,8 graden Celsius voor alle drie deze zichtjaren en dus wordt verondersteld dat de temperatuur constant blijft vanaf 2050 in dat scenario. De scenario's Ln en Ld zijn voor 2050, 2100 en 2150 dus gelijk. Daarmee bestaan er in totaal 15 KNMI'23-klimaatscenario's:

2033: L
 2050: Mn, Md, Hn, Hd
 2100: Ln, Ld, Mn, Md, Hn, Hd
 2150: Mn, Md, Hn, Hd

De KNMI'23-klimaatscenario's zijn afgeleid uit simulaties met RACMO EC-EARTH (hierna RACMO) en hogere resolutie Convection-Permitting-Models (CPM's) voor geselecteerde SSP's. De CPM's rekenen met een hogere ruimtelijke en temporele resolutie en zijn daarom beter in staat de effecten van convectie op neerslagextremen te simuleren. Convectieve neerslag is vooral relevant voor de statistiek bij kortere dueren en deze simulaties zijn dan ook gebruikt

1 Het KNMI heeft voor specifieke toepassingen aanvullende berekeningen voor een matige CO₂-uitstoot gemaakt. De resultaten van dit midden scenario zijn niet opgenomen in bijvoorbeeld de kerncijfertabel, maar op verzoek wel beschikbaar voor professionals.

om effecten van klimaatverandering op sub-dagelijkse neerslagextremen te bepalen. RACMO rekt op uurbasis en is gebruikt om effecten van klimaatverandering op dagneerslag of langdurigere neerslag te bepalen. De ruimtelijke resolutie van RACMO is 12x12 km² en van de CPM's 2,5x2,5 km². De RACMO simulaties resulteren in 8 reeksen van 30 jaar; de uitvoer van de CPM's is een reeks van 10 jaar.

1.4 UITGANGSPUNTEN

Deze rapportage betreft het opstellen van neerslagstatistiek en neerslagreeksen voor de 15 KNMI'23-klimaatsscenario's, zowel voor het gehele jaar als voor de winter (NDJF). We maken daarbij gebruik van de RACMO simulaties die ten grondslag liggen aan de KNMI'23-klimaatsscenario's en conclusies van het KNMI met betrekking tot neerslagextremen van 1 uur en 24 uur in het Wetenschappelijk Rapport van de KNMI'23-klimaatsscenario's (KNMI, 2023).

Voor de KNMI'14-klimaatsscenario's is gewerkt met drie varianten van neerslagstatistiek per klimaatscenario. Deze geven een beeld van de onzekerheid binnen een klimaatscenario door een bovengrens (upper), een midden (centre) en een ondergrens (lower) te presenteren. In de praktijk is gebleken dat de resulterende 27 mogelijkheden van zichtjaren, scenario's en varianten bij gebruikers tot verwarring leiden en zelden allemaal worden gebruikt. Veelal wordt gekozen met één variant van een bepaald scenario te werken. Om deze reden is in overleg met de begeleidingscommissie besloten voor de KNMI'23-klimaatsscenario's geen bandbreedtes te bepalen en is dus per scenario en zichtjaar één variant neerslagstatistiek afgeleid; de beste schatting.

1.5 LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 behandelt de afleiding van de neerslagstatistiek voor de 15 KNMI'23-klimaatsscenario's. De totstandkoming van de neerslagreeksen is in Hoofdstuk 3 beschreven. Tot slot gaat Hoofdstuk 4 in op grootschalige neerslaggebeurtenissen zoals die in juli 2021.

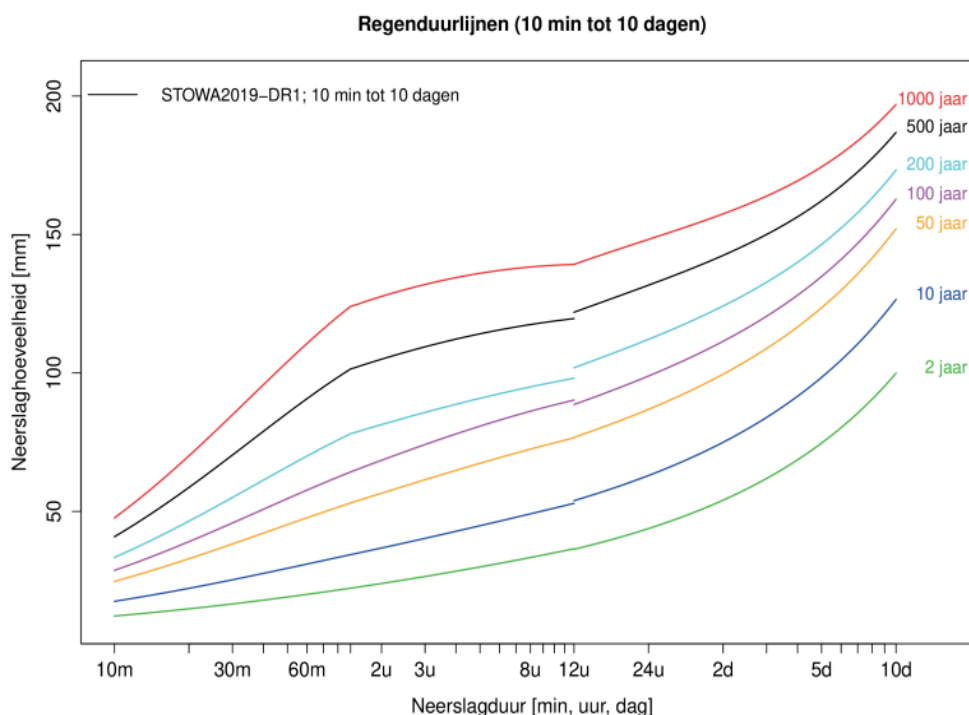
2

NEERSLAGSTATISTIEK KNMI'23

2.1 ACHTERGROND BASIS- EN KLIMAATSTATISTIEK

In het verleden is de basisstatistiek, de statistiek voor huidig klimaat, afgeleid voor de lange duren (STOWA, 2015) op basis van uurmetingen bij De Bilt en voor de korte duren (STOWA, 2018) op basis van 10-minutenmetingen bij automatische weerstations. Vanwege het gebruik van andere onderliggende databronnen was de statistiek voor korte en lange duren niet onderling consistent. In STOWA (2019) zijn de duren van 2 uur tot 12 uur aangepast om de korte duren (10 minuten tot 2 uur) en de lange duren (12 uur tot 10 dagen) op elkaar aan te laten sluiten. Het resultaat zijn de regenduurlijnen in Figuur 2.

FIGUUR 2 GEACTUALISEERDE REGENDUURLIJNEN VOOR DE BASISSTATISTIEK VOOR HET GEHELE JAAR (FIGUUR 6, STOWA 2019)



In STOWA (2019) is vervolgens neerslagstatistiek voor de KNMI'14-klimaatscenario's afgeleid door vermenigvuldigingsfactoren toe te passen op de basisstatistiek, en wel op zodanige wijze dat de consistentie tussen de duren gewaarborgd bleef. Ter illustratie zijn de verandergetallen voor één van de KNMI'14-klimaatscenario's (2050 upper) gegeven in Tabel 1. Voor het afleiden van klimaatstatistiek op basis van de KNMI'23-klimaatscenario's kiezen we opnieuw voor het toepassen van vermenigvuldigingsfactoren om de consistentie tussen duren en herhalingstijden te waarborgen.

In STOWA (2023) is geconcludeerd dat het meenemen van metingen t/m 2022 geen aanleiding geeft tot herziening van de basisstatistiek zoals gepresenteerd in STOWA (2019). Uitgangspunt in de afleiding van de klimaatstatistiek is dat de basisstatistiek representatief is

voor het klimaat anno 2023. De verandergetallen worden dus toegepast op de basisstatistiek uit STOWA (2019).

TABEL 1 PROCENTUELE TOENAME IN NEERSLAGHOEVEELHEDEN (%) TUSSEN DE BASISSTATISTIEK VOOR HET GEHELE JAAR IN DE HUIDIGE SITUATIE EN DE STATISTIEK VOOR SCENARIO "2050 UPPER" UIT DE KNMI'14-KLIMAATSCENARIO'S. BRON: STOWA (2019)

T [jaar]	Neerslagduur							
	10 min	30 min	60 min	2 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
0.5	21.3	21.3	21.3	21.3	20.4	18.8	17.1	12.2
1	21.3	21.3	21.3	21.3	20.5	19.1	17.7	13.4
2	21.3	21.3	21.3	21.3	20.6	19.4	18.1	14.4
5	21.3	21.3	21.3	21.3	20.7	19.6	18.6	15.3
10	21.3	21.3	21.3	21.3	20.8	19.8	18.8	15.9
20	21.3	21.3	21.3	21.3	20.8	19.9	19.0	16.3
25	21.3	21.3	21.3	21.3	20.8	19.9	19.1	16.4
50	21.3	21.3	21.3	21.3	20.8	20.0	19.2	16.8
100	21.3	21.3	21.3	21.3	20.9	20.1	19.4	17.1
200	21.3	21.3	21.3	21.3	20.9	20.2	19.5	17.3
250	21.3	21.3	21.3	21.3	20.9	20.2	19.5	17.4
500	21.3	21.3	21.3	21.3	20.9	20.3	19.6	17.6
1000	21.3	21.3	21.3	21.3	20.9	20.3	19.7	17.8

2.2 DOEL EN AFBAKENING WERKWIJZE KLIMAATSTATISTIEK

Het doel van de analyses in dit hoofdstuk is het afleiden van extreme neerslagstatistiek voor de 15 klimaatscenario's, zowel voor het gehele jaar als voor de winterperiode NDJF, voor alle duren tussen 10 minuten en 10 dagen. Dit gebeurt door vermenigvuldigingsfactoren af te leiden ten opzichte van de statistiek voor het huidige klimaat op basis van gegevens en analyses van het KNMI. Deze factoren noemen we in het vervolg verandergetallen.

Voor het afleiden van de statistiek is gebruik gemaakt van RACMO simulaties zoals beschreven in KNMI (2023). Deze simulaties vormden de basis voor de KNMI'23-klimaatscenario's. Er is gebruik gemaakt van de neerslag-tijdreeksen voor de rastercel waarin De Bilt zich bevindt. Daarmee wordt aangesloten op de statistiek voor lange duren die uit metingen bij De Bilt is afgeleid. Naast de simulaties voor ieder klimaatscenario, bestaan ook simulaties voor huidig klimaat, het zogenaamde controlescenario. Er is gekozen om te werken met de relatieve verandering tussen klimaatscenario en controlescenario, in plaats van de statistiek die direct uit de simulaties volgt. Deze keuze is gemaakt omdat de relatieve verandering uit de simulaties betrouwbaarder wordt geacht dan de absolute neerslaghoeveelheden. Uit deze relatieve verandering volgen de verandergetallen.

In Hoofdstuk 5 van KNMI (2023) zijn verandergetallen voor 1 en 24 uur afgeleid op basis van Convection Permitting Models (CPM) resultaten. Deze cijfers zijn opgenomen in de kerncijfertabel in het gebruikersrapport van het KNMI. In Paragraaf 2.3 van dit rapport worden de belangrijkste resultaten uit hoofdstuk 5 van KNMI (2023) gepresenteerd. Paragraaf 2.4 gaat in op de werkwijze die is toegepast om verandergetallen af te leiden uit de RACMO simulaties voor duren van 1 dag en langer. In Paragraaf 2.5 zijn de resultaten van de analyses met RACMO en CPM's met elkaar vergeleken en wordt de definitieve keuze voor de te gebruiken verandergetallen onderbouwd. Daarbij is er zorg gedragen dat deze verandergetallen aansluiten

op de verandergetallen gepresenteerd in KNMI (2023). Deze verandergetallen leveren uiteindelijk de statistiek van extreme neerslag op voor de 15 klimaatscenario's.

2.3 CPM'S: EFFECT VAN KLIMAATVERANDERING OP SUBDAGELIJKSE NEERSLAGEXTREMEN

In Hoofdstuk 5 van KNMI (2023) worden veranderingen in sub-dagelijkse neerslagextremen besproken. Deze extremen zijn vaak het gevolg van (kortdurende) convectieve buien. Zulke buien vallen over het algemeen in het zomerseizoen, dat ruwweg van mei tot aan september loopt. In een opwarmend klimaat zal de neerslag mogelijk ook in andere seizoenen meer convectief van aard zijn. Samenvattend is convectieve neerslag vooral dominant voor de statistiek bij korte duren.

Het is door interacties op verschillende ruimtelijke en temporele schalen complex om veranderingen in convectieve neerslagextremen te begrijpen en te voorspellen. De uitkomsten van mondiale klimaatmodellen, regionale klimaatmodellen en zogenoemde Convection Permitting Models (CPM's) zijn gebruikt om effecten van klimaatverandering op sub-dagelijkse neerslagextremen te schatten. In het bijzonder gaat het om de veranderingen in de extreme uurlijkse en dagelijkse neerslagvolumina.

De CPM's hebben een hogere ruimtelijke en temporele resolutie dan RACMO. Daarmee zijn de modellen beter in staat de effecten van convectie op neerslagextremen te simuleren. Zo is de ruimtelijke resolutie van HARMONIE 2,5 km en de temporele uitvoer is uurlijks. Met verschillende CPM's zijn reeksen van ~10 jaar aan neerslag gesimuleerd. Op basis van deze reeksen heeft het KNMI de relatieve verandering in de extreme uurlijkse en dagelijkse neerslagvolumina geschat voor ieder seizoen, waarbij de seizoenen zijn gedefinieerd als DJF (december, januari, februari), MAM, JJA en SON. De relatieve verandering is eerst bepaald voor de scenario's met 4 graden Celsius mondiale opwarming (2100 Hn en 2100 Hd). De waarden voor andere scenario's zijn bepaald door lineair te schalen met de mondiale temperatuurstijging in de scenario's.

Tabel 2 tot en met Tabel 5 bevatten de relatieve verandering in uurlijkse en dagelijkse neerslagvolumina voor enkele terugkeertijden in het 2100 Hn en 2100 Hd scenario zoals gerapporteerd in KNMI (2023). Uit deze tabellen en de bijbehorende figuren (Figure 5.5 – Figure 5.6 uit KNMI, 2023) blijkt dat de bandbreedte van deze verandergetallen relatief groot is. In het zomerseizoen JJA is de totale spreiding in de dagelijkse neerslagvolumina bijvoorbeeld ongeveer 25-35 procentpunt voor terugkeertijden van 100 en 1.000 jaar (zie Tabel 4 en Tabel 5).

De extreme dagelijkse neerslagvolumina treden voornamelijk in de zomer- en in de herfstmaanden op. In de toekomst blijft dit zo en het verschil tussen de zomer- en herfstmaanden neemt af, omdat de relatieve verandering in de herfstmaanden groter is dan in de zomermaanden (zie Tabel 4 en Tabel 5).

Voor uurlijkse neerslag zijn de verandergetallen in de herfstmaanden relatief ook het hoogste, maar de extreme uurlijkse neerslagvolumina zijn in het huidige klimaat in de herfst duidelijk lager dan in de zomermaanden. Daarom zal de extreme uurlijkse neerslag ook in de klimaatscenario's voornamelijk in de zomer vallen (zie Tabel 2 en Tabel 3).

TABEL 2 RELATIEVE VERANDERING NEERSLAGVOLUMINA VOOR URSOMMEN IN 2100 HD (BRON: TABLE 5.7 UIT KNMI, 2023)

Terugkeertijd	DJF	MAM	JJA	SON
1	15 - 32 (23)	5 - 14 (25)	5 - 26 (15)	15 - 39 (27)
10	16 - 34 (25)	5 - 15 (26)	9 - 30 (19)	17 - 43 (30)
100	17 - 35 (25)	5 - 15 (26)	11 - 32 (21)	18 - 45 (31)
1000	17 - 35 (26)	5 - 15 (26)	12 - 33 (22)	19 - 46 (32)

TABEL 3 RELATIEVE VERANDERING NEERSLAGVOLUMINA VOOR URSOMMEN IN 2100 HN (BRON: TABLE 5.8 UIT KNMI, 2023)

Terugkeertijd	DJF	MAM	JJA	SON
1	18 - 39 (28)	6 - 34 (20)	17 - 46 (31)	22 - 55 (55)
10	19 - 41 (30)	6 - 35 (20)	19 - 48 (33)	24 - 60 (60)
100	20 - 43 (31)	7 - 36 (20)	19 - 48 (33)	25 - 61 (61)
1000	20 - 43 (31)	7 - 36 (20)	20 - 49 (34)	25 - 62 (62)

TABEL 4 RELATIEVE VERANDERING NEERSLAGVOLUMINA VOOR DAGSOMMEN IN 2100 HD (BRON: TABLE 5.5 UIT KNMI, 2023)

Terugkeertijd	DJF	MAM	JJA	SON
1	17 - 32 (24)	4 - 26 (15)	-6 - 8 (1)	9 - 28 (18)
10	17 - 32 (24)	7 - 35 (21)	5 - 26 (15)	13 - 35 (24)
100	17 - 32 (24)	9 - 39 (23)	8 - 32 (20)	14 - 37 (25)
1000	17 - 32 (24)	9 - 41 (25)	10 - 35 (22)	15 - 37 (26)

TABEL 5 RELATIEVE VERANDERING NEERSLAGVOLUMINA VOOR DAGSOMMEN IN 2100 HN (BRON: TABLE 5.6 UIT KNMI, 2023)

Terugkeertijd	DJF	MAM	JJA	SON
1	20 - 39 (29)	5 - 36 (20)	2 - 23 (12)	14 - 40 (27)
10	20 - 39 (29)	10 - 49 (28)	12 - 41 (26)	19 - 48 (33)
100	20 - 39 (29)	12 - 55 (32)	15 - 47 (30)	20 - 50 (34)
1000	20 - 39 (29)	13 - 58 (34)	16 - 49 (32)	21 - 50 (35)

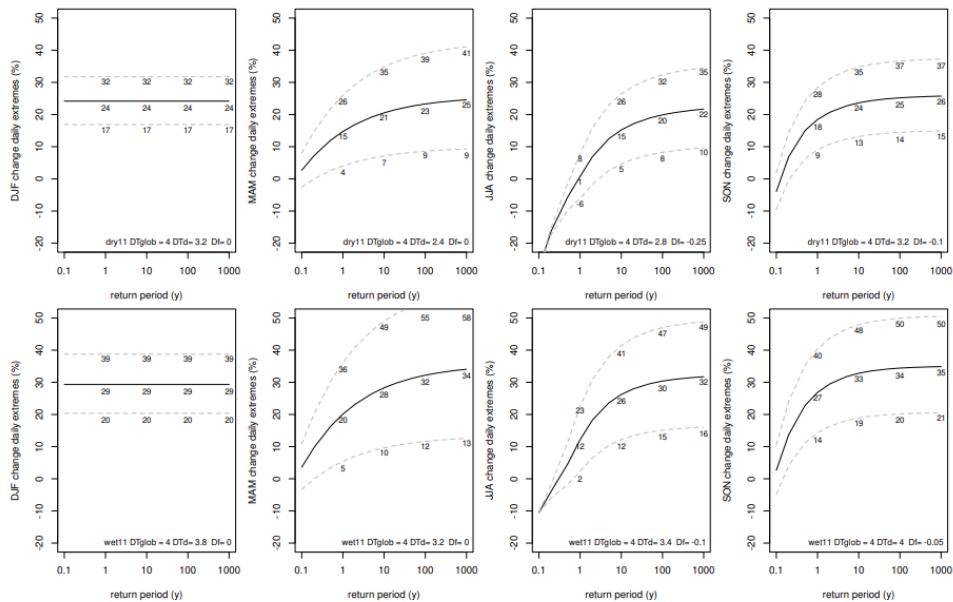


Figure 5.32: Scenarios for daily rainfall extremes for a global temperature rise of 4 °C. Upper panel shows the results for the dry scenario, and lower panel for the wet scenario. From left to right, results for DJF, MAM, JJA and SON.

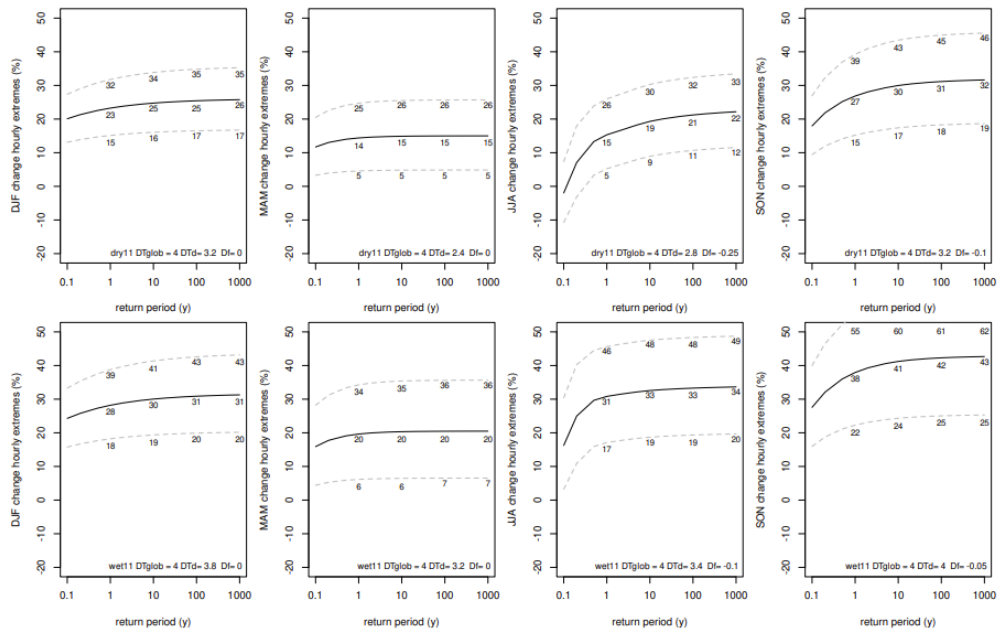


Figure 5.33: Scenarios for hourly rainfall extremes for a global temperature rise of 4 °C (similar to previous figure).

2.4 AFLEIDEN VERANDERGETALLEN MET RACMO

In deze paragraaf wordt de afleiding van de verandergetallen voor duren vanaf één dag uitgewerkt. Deze verandergetallen worden uiteindelijk toegepast op de statistiek van het huidige klimaat om de statistiek van de KNMI'23 scenario's te bepalen. De verandergetallen worden afgeleid uit de resultaten van RACMO simulaties. Vanuit RACMO zijn voor ieder van de 15 klimaatscenario's 8 tijdreeksen van 30 jaar beschikbaar. Door de tijdreeksen te combineren ontstaat een reeks van 240 jaar per scenario. Voor ieder scenario is ook een controlescenario beschikbaar. Dit scenario simuleert het huidige klimaat. Uit Van den Brink et al. (2023) blijkt dat het controlescenario behorende bij Md 2050 ('control_Md2050') het huidige klimaat het beste representeert. Daarom is dit controlescenario in de bepaling van de verandergetallen gebruikt als referentiescenario.

Op hoofdlijnen zijn de verandergetallen als volgt bepaald:

1. Fitten GEV-verdelingen

Voor alle scenario's inclusief het controlescenario worden uit de 240 jaar simulaties jaarmaxima bepaald voor duren van 1 t/m 10 dagen in stappen van één dag. Voor alle scenario's en alle duren wordt een GEV-verdeling gefit op deze jaarmaxima.

2. Consistente regenduurlijnen inclusief onzekerheidsmarges

Uit deze GEV-verdelingen zijn regenduurlijnen opgesteld voor ieder scenario. De onzekerheid in de fit wordt doorvertaald naar een onzekerheidsmarge in de regenduurlijnen. Dit resulteert ook in knikpunten en sprongen in de regenduurlijnen. Deze worden in de regenduurlijnen door middel van gladstrijken (smoothing) verwijderd.

3. Verandergetallen

Uit de gladgestreken regenduurlijnen wordt de relatieve verandering van neerslaghoeveelheid per scenario, duur en terugkeertijd bepaald. De onzekerheidsmarge in de relatieve verandering is gebaseerd op de onzekerheidsmarge in de regenduurlijnen.

In het vervolg zijn de resultaten van iedere stap toegelicht.

2.4.1 GEFITTE GEV-VERDELINGEN

Voor ieder scenario en voor iedere duur is overeenkomstig STOWA (2019) een GEV-verdeling gefit op de jaarmaxima, waarbij de vormparameter is vastgezet op de (duurafhankelijke) waarde uit STOWA (2019). Dat betekent dat telkens alleen de locatie- en schaalparameter zijn geschat met de methode van *maximum likelihood*.

De vormparameter is een zeer bepalende parameter, maar het is moeilijk om deze statistisch betrouwbaar te schatten op relatief korte reeksen van 240 jaar. Bovendien is uit eerdere studies gebleken dat de vormparameter weinig verschilt in verschillende klimaten (van den Brink, 2023) en (van den Brink, Groeneweg, van Nieuwkoop, 2022). Daarom nemen we binnen deze studie aan dat de vormparameter in de toekomstscenario's gelijk is aan de vormparameter voor het huidige klimaat.

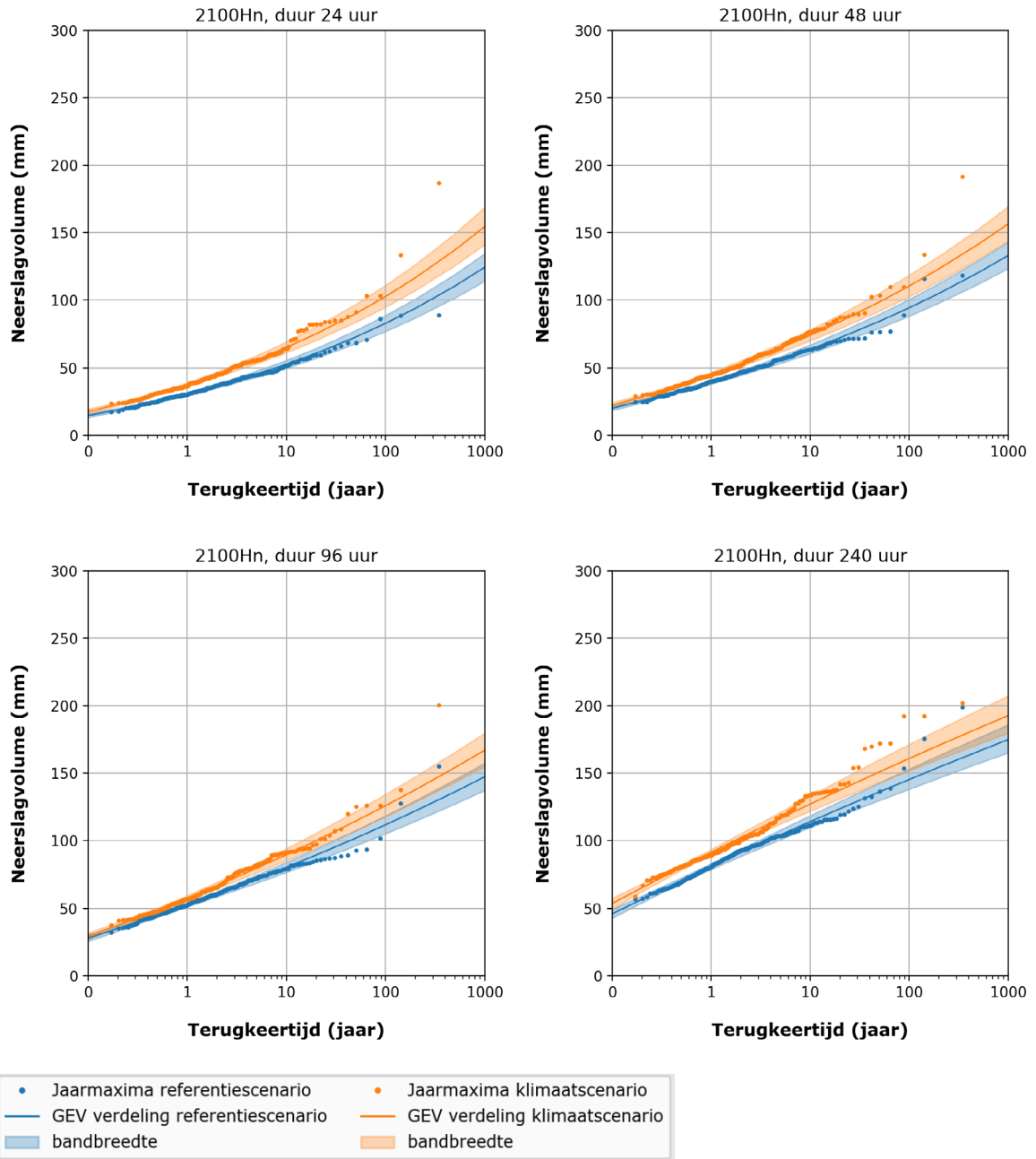
De fits van de GEV-verdelingen op de jaarmaxima van de RACMO reeksen zijn over het algemeen behoorlijk goed. De grafieken in Figuur 3 illustreren dit voor het scenario 2100 Hn bij vier verschillende duren. Voor de langste duren liggen de meest extreme jaarmaxima van RACMO echter boven de gefitte kansverdeling. Dit is een gevolg van het vastleggen van de vormparameter, om redenen besproken in de vorige alinea. De grafieken laten ook zien dat de jaarmaxima in het 2100 Hn scenario duidelijk boven het referentiescenario liggen, wat duidt op een toename van extreme neerslag.

Met behulp van *bootstrapping* (trekkingen uit de jaarmaxima met terugleggen) is de onzekerheid² rondom de parameters van de kansverdelingen en de bijbehorende neerslagvolumina afgeleid. De grafieken in Figuur 3 tonen deze onzekerheid als bandbreedtes rond de neerslaghoeveelheden. De grafieken illustreren daarmee ook de invloed die de willekeur in de simulaties heeft op de neerslaghoeveelheden.

2 Voor iedere trekking van jaarmaxima zijn opnieuw de parameters van de GEV-verdeling geschat. Uit die resultaten zijn de kwantielen van de kansverdeling bepaald (dat zijn neerslagvolumina). Het 2,5^e percentiel en het 97,5^e percentiel van deze waarden vormen een schatting van de 95%-betrouwbaarheidsintervallen van de neerslagvolumina. In het vervolg spreken we van de bandbreedte van de neerslagvolumina.

FIGUUR 3 GEV-FITS OP DE JAARMAXIMA (GEHELE JAAR) VAN DE RACMO-MODELREEKSEN VOOR SCENARIO 2100 HN BIJ DUREN VAN 24 UUR, 48 UUR, 96 UUR EN 240 UUR (PLOTPOSITIES JAARMAXIMA O.B.V. BENARD EN BOS-LEVENBACH, 1953)

GEV-FITS VOOR HET GEHELE JAAR



2.4.2 CONSISTENTE REGENDUURLIJNEN

De gefitte kansverdelingen zijn de basis voor het bepalen van regenduurlijnen die het verband tonen tussen de duur (horizontale as) en het neerslagvolume (verticale as) bij een gegeven terugkeertijd. Figuur 4 toont ter illustratie grafieken van de regenduurlijnen voor de scenario's 2100 Hn en 2150 Hn bij de terugkeertijden 1, 10, 100 en 1.000 jaar voor het gehele jaar. Bovendien is te zien dat, conform verwachting, de bandbreedte van de neerslagvolumina toeneemt met de terugkeertijd.

De regenduurlijnen moeten aan bepaalde consistentie-eisen voldoen. Basale eisen zijn dat de neerslagvolumina met een bepaalde terugkeertijd stijgend zijn in de duur en dat de volumina bij een bepaalde duur stijgend zijn in de terugkeertijd. Omdat de regenduurlijnen uit RACMO simulaties zijn bepaald, zit er een mate van willekeurigheid in de simulaties. Vooral in de staart van de kansverdeling kan de willekeurigheid van de simulaties bepalend zijn voor de resulterende regenduurlijn. Omdat we met reeksen van 240 jaar te maken hebben, speelt die willekeurigheid een rol bij terugkeertijden van ongeveer 100 jaar en langer. Dit heeft als gevolg dat de regenduurlijnen niet per definitie monotoon stijgen. Dit is bijvoorbeeld te zien in het rechterpaneel van Figuur 4, waar de regenduurlijn voor scenario 2150 Hn bij een terugkeertijd van 1.000 jaar licht daalt tussen 96 en 120 uur. Dergelijk niet-monotoon gedrag en/of oneffenheden worden opgelost door de regenduurlijnen glad te strijken (met 'spline smoothing'). Dit is te verantwoorden omdat de regenduurlijnen daarmee binnen de onzekerheidsmarges blijven. Merk op dat de neerslaghoeveelheden per definitie toenemen met de terugkeertijd bij gegeven duur. Het resultaat van het glad strijken is weergegeven in Figuur 5. In het vervolg is doorgewerkt met de glad gemaakte regenduurlijnen.

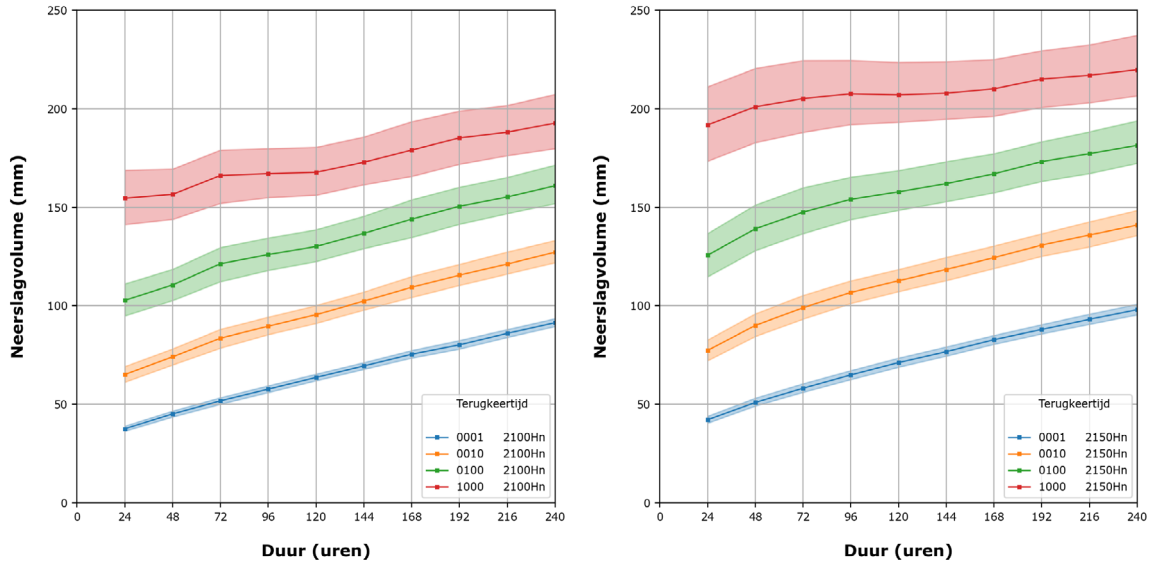
Wat betreft consistentie wordt ook verwacht dat een scenario met een hogere temperatuurstijging gepaard gaat met een groter neerslagvolume. De temperatuurstijging neemt toe met het zichtjaar (2050/2100/2150) bij hetzelfde scenario en in het type scenario (L/M/H) bij hetzelfde zichtjaar. Conform verwachting laten de grafieken in Figuur 6 zien dat de volumina voor het Hn-scenario (gehele jaar) over het algemeen groter zijn dan die voor het Mn-scenario, die op haar beurt weer groter zijn dan de volumina voor het Ln-scenario (beschouw hiertoe per paneel per kleur de volgorde van de doorgetrokken lijn, de onderbroken lijn en de stippellijn). In 2050 zijn de verschillen in neerslagvolumina relatief klein, maar dat geldt ook voor de verschillen in temperatuurstijging. Over het algemeen nemen de neerslaghoeveelheden dus toe met de temperatuurstijging. De grafieken voor de droge scenario's (gehele jaar en winterperiode NDJF) en voor de winterperiode van de natte scenario's zijn niet toegevoegd, maar vertonen hetzelfde beeld.

De grafieken in Figuur 7 tonen het verband tussen zichtjaar en neerslagvolumina. In het Ln-scenario zijn de verschillen relatief klein, net als de verschillen in temperatuurstijging. In het Mn-scenario zijn de verschillen klein, maar nemen de volumina niet bij alle terugkeertijden toe naarmate het zichtjaar verder weg ligt, de lijnen kruisen elkaar. In het Hn-scenario nemen de volumina bij alle terugkeertijden duidelijk toe met het zichtjaar. Voor de droge scenario's (gehele jaar en winter) en de natte scenario's in de winter worden vergelijkbare resultaten gevonden.

Samenvattend kunnen we stellen dat de uitkomsten in termen van neerslaghoeveelheden redelijk consistent zijn in de temperatuurstijging (zichtjaar en type scenario). Voorkomend niet-monotoon gedrag wordt besproken en opgelost in Paragraaf 2.5.1.

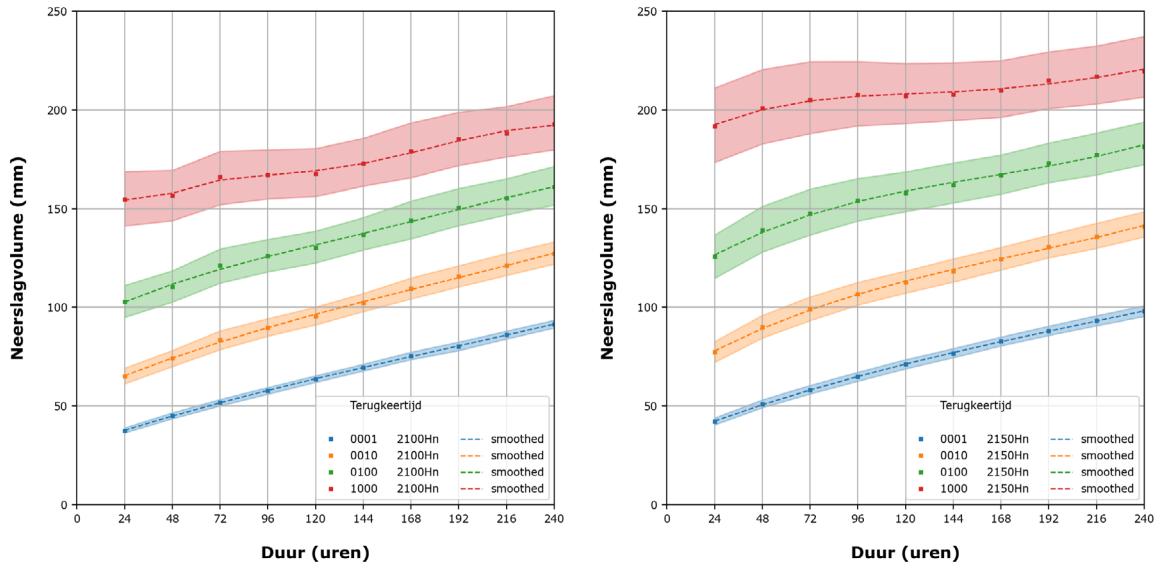
FIGUUR 4 REGENDUURLIJNEN VOOR HET GEHELE JAAR VOOR DE SCENARIO'S 2100 HN (LINKS) EN 2150 HN (RECHTS) BIJ DUREN VAN 24 UUR TOT EN MET 240 UUR

REGENDUURLIJNEN VOOR HET GEHELE JAAR



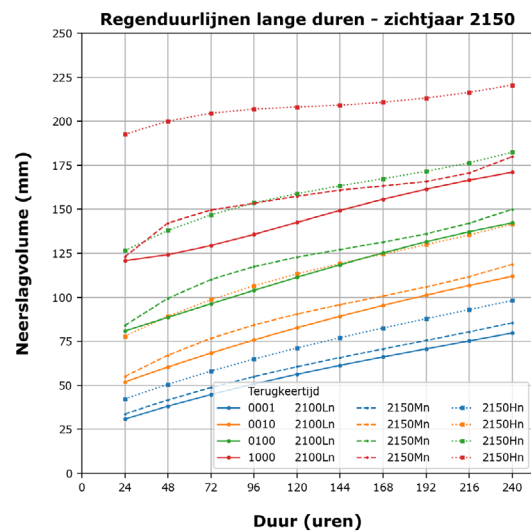
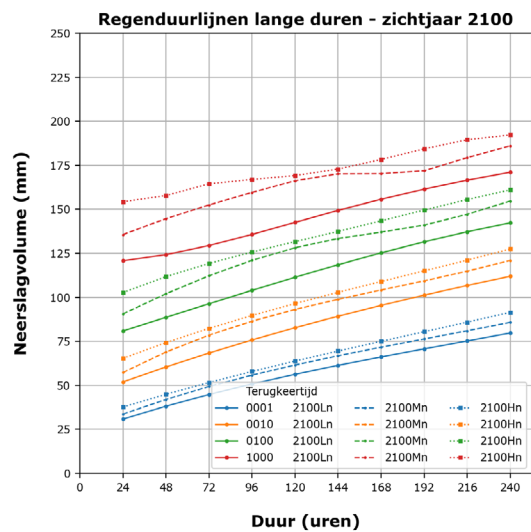
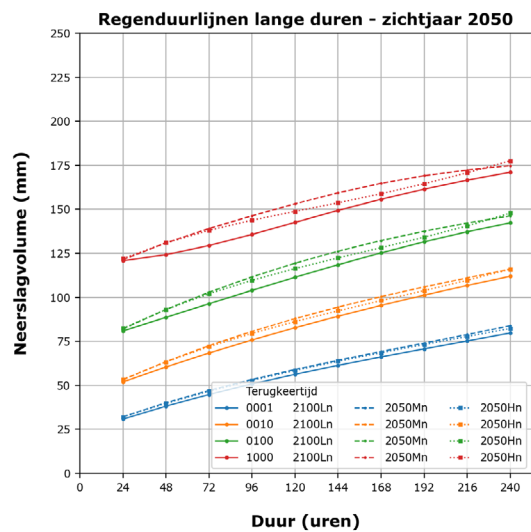
FIGUUR 5 REGENDUURLIJNEN VOOR HET GEHELE JAAR MET SMOOTHING VOOR DE SCENARIO'S 2100 HN (LINKS) EN 2150 HN (RECHTS) BIJ DUREN VAN 24 UUR TOT EN MET 240 UUR

REGENDUURLIJNEN VOOR HET GEHELE JAAR NA GLADSTRIJKEN



FIGUUR 6 VERLOOP REGENDUURLIJNEN (GEHELE JAAR, NAT) OVER DE SCENARIOSETS VOOR DE ZICHTJAREN 2050, 2100 EN 2150 BIJ VIER TERUGKEERTIJDEN

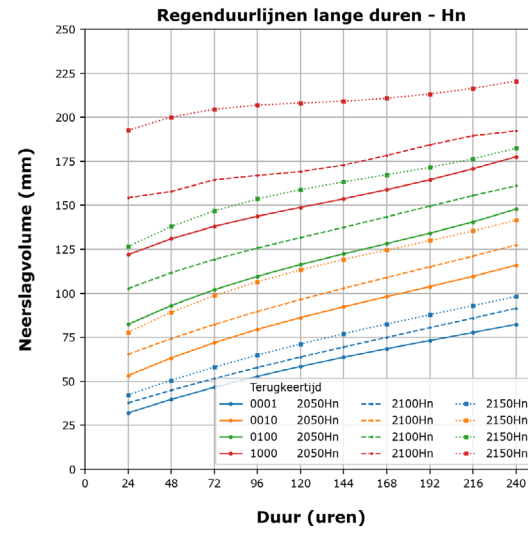
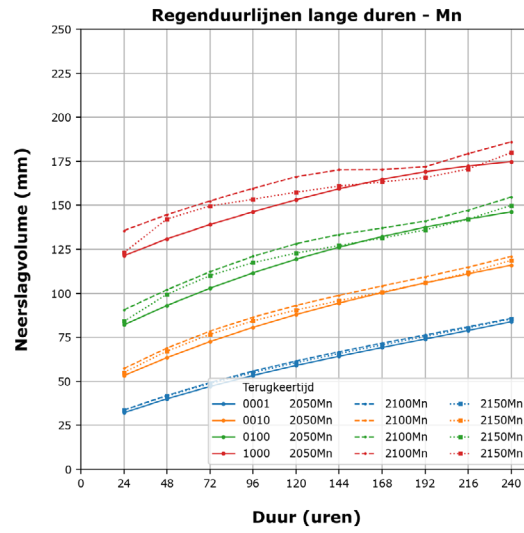
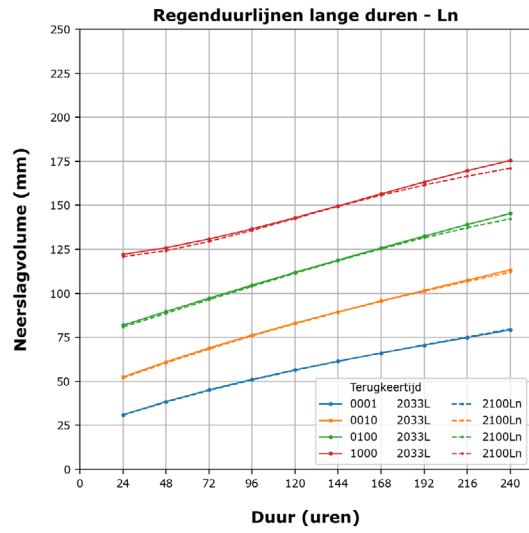
REGENDUURLIJNEN NA GLADSTRIJKEN VOOR DRIE ZICHTJAREN



FIGUUR 7 VERLOOP REGENDUURLIJNEN (GEHELE JAAR, NAT) OVER DE ZICHTJAREN VOOR DE SCENARIOSETS (L, M, H) BIJ VIER TERUGKEERTIJDEN

REGENDUURLIJNEN NA GLADSTRIJKEN VOOR DRIE SCENARIOSETS

14



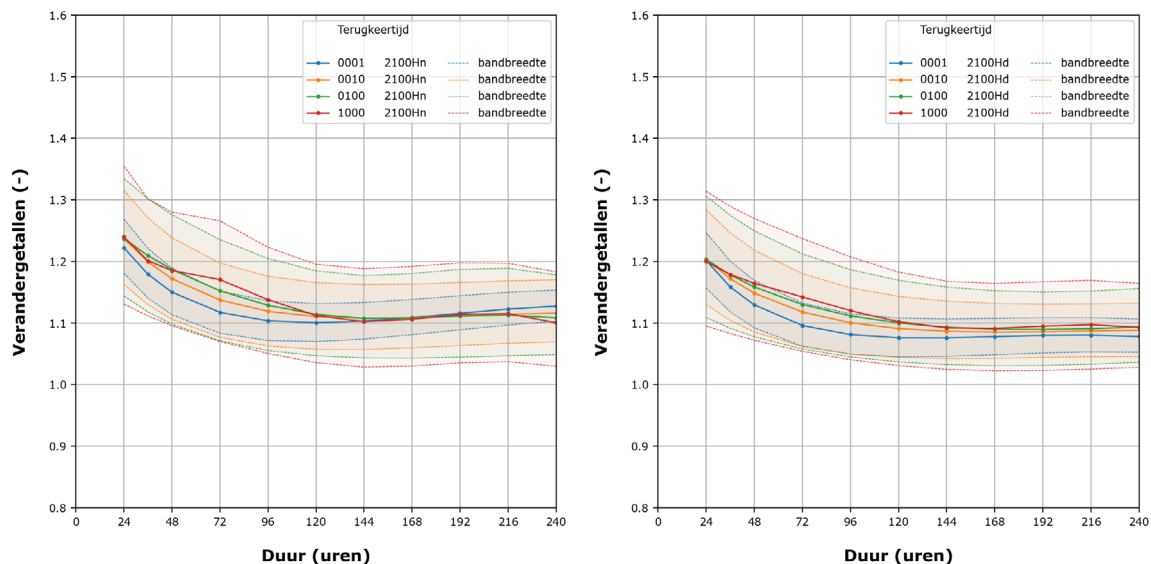
2.4.3 VERANDERGETALLEN RACMO

De relatieve verandering in neerslagvolumina in een KNMI'23-klimaatscenario wordt bepaald door de neerslaghoeveelheid in het KNMI'23-klimaatscenario's te delen door de neerslaghoeveelheid in het referentiescenario. De uitkomst noemen we verandergetal. Dit getal is in het algemeen groter dan 1. Als het verandergetal gelijk is aan 1,1 is, dan is de procentuele toename gelijk aan 10%. De bandbreedte rond de verandergetallen wordt afgeleid op basis van *alleen* de bandbreedtes van de neerslagvolumina in het KNMI'23-klimaatscenario en niet van die in het referentiescenario. Daarmee zijn de gegeven bandbreedtes een onderschatting van de totale onzekerheid in de verandergetallen.

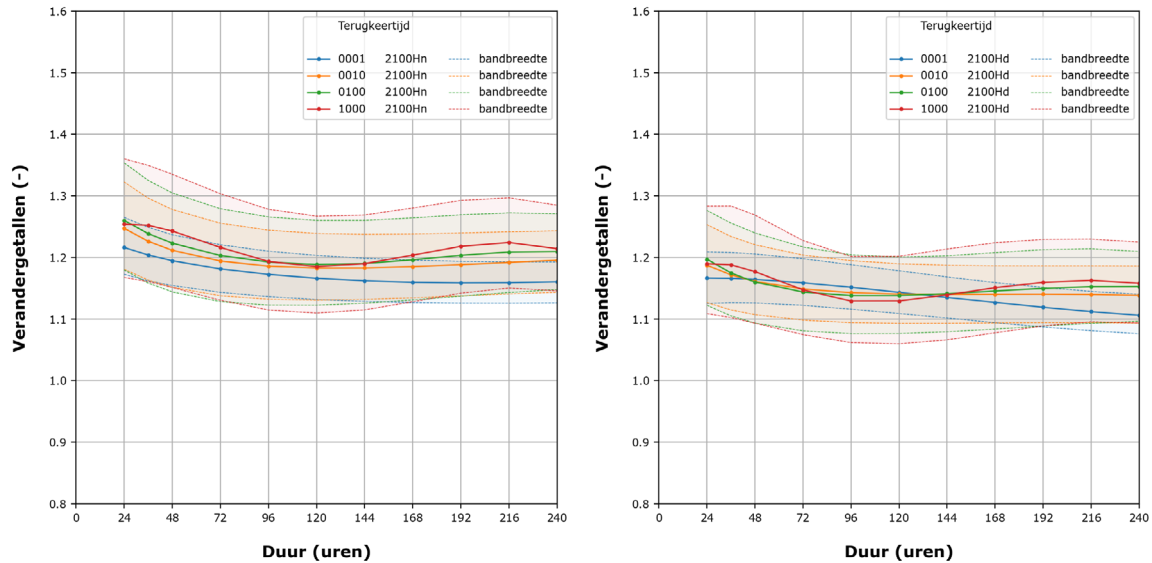
Vooraf zijn geen verwachtingen opgesteld over het verloop van de verandergetallen, maar een niet-monotoon verloop waarbij het getal nu weer stijgt en dan weer daalt bij toenemende duur is fysisch gezien onwaarschijnlijk. Daarnaast is de verwachting op basis van de regenduurlijnen en de fysica dat hogere temperatuurstijgingen tot hogere verandergetallen leiden. De uitkomsten moeten sowieso in het licht van de onzekerheid beschouwd worden. Een schokkerig verloop zou schijnnaauwkeurigheid introduceren. In paragrafen 2.5.4-2.5.6 wordt eventueel niet-monotoon verloop opgelost.

De grafieken in Figuur 8 en Figuur 9 tonen ter illustratie het verloop van de verandergetallen in scenario's 2100 Hn en 2100 Hd voor zowel het gehele jaar als de winterperiode als functie van de duur. De bandbreedtes zijn behoorlijk groot, zeker voor de extremere terugkeertijden. Uit deze grafieken blijkt dat de verandergetallen in de twee scenario's nauwelijks van elkaar verschillen voor het gehele jaar. De verandergetallen in scenario 2100 Hn zijn voor de winter iets hoger dan die in 2100 Hd. In Bijlage A zijn vergelijkbare grafieken opgenomen voor de andere scenario's.

FIGUUR 8 VERANDERGETALLEN JAARROND IN DE SCENARIO'S 2100 HN EN 2100 HD INCLUSIEF BANDBREEDTE



FIGUUR 9 VERANDERGETALLEN WINTERPERIODE NDJF IN DE SCENARIO'S 2100 HN EN 2100 HD INCLUSIEF BANDBREEDTE



2.5 BEOORDELING EN KEUZES VERANDERGETALLEN

In deze paragraaf worden de resultaten uit paragraaf 2.4 en de inzichten uit de CPM's (paragraaf 2.3) naast elkaar gelegd om tot een keuze voor definitieve verandergetallen te komen.

2.5.1 SCHALEN MET MONDIALE OPWARMING

Eerst behandelen we de verandergetallen voor het gehele jaar. De verandergetallen die zijn afgeleid met RACMO zijn voor de scenario's met een relatief lage temperatuurstijging niet significant groter dan 1. Voor het lage scenario zien we een lichte afname, maar gezien de bandbreedtes zou dit ook een lichte toename of geen verandering kunnen zijn. Voor het midden- en hoge scenario liggen de verandergetallen voor 2050 ook rond 1. Ook hier geldt dat het gezien de bandbreedtes geen of een lichte toename van extreme neerslag kan betekenen.

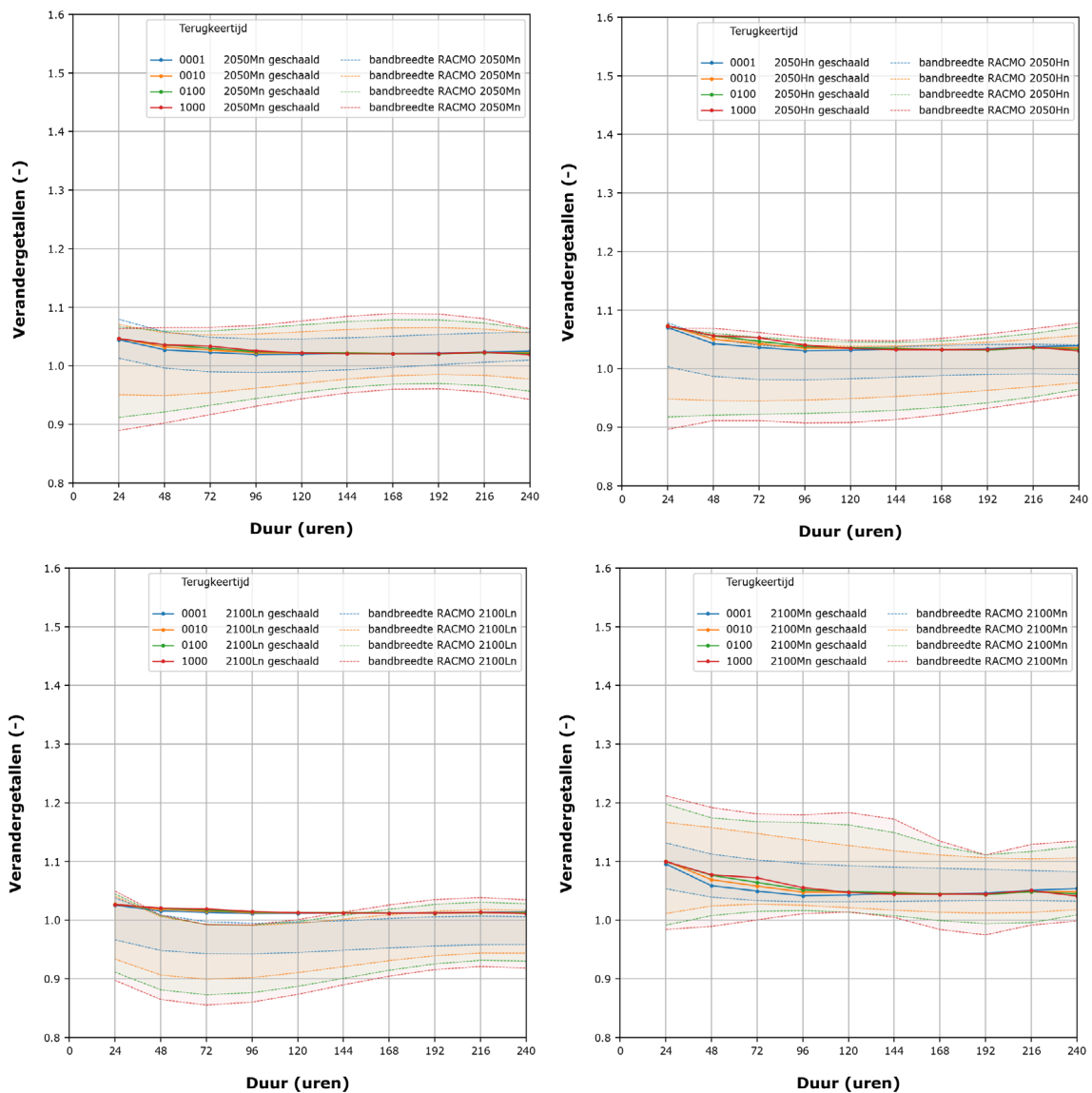
Voor de scenario's 2100 Hn en 2100 Hd met 4 graden Celsius temperatuurstijging zijn de verandergetallen duidelijk groter dan 1. De relatieve verandering is ongeveer 20% voor de duur van 24 uur (zie Figuur 8) en dit komt ongeveer overeen met de uitkomsten van de CPM's (zie Paragraaf 2.3). Voor de meest extreme scenario's in zichtjaar 2150 met 5,5 graden Celsius temperatuurstijging zijn de verandergetallen 1,4 tot 1,5 (dus 40% tot 50%). De getallen komen daarmee minder goed overeen met de uitkomsten van de CPM's voor de scenario's 2150 Hn en 2150 Hd.

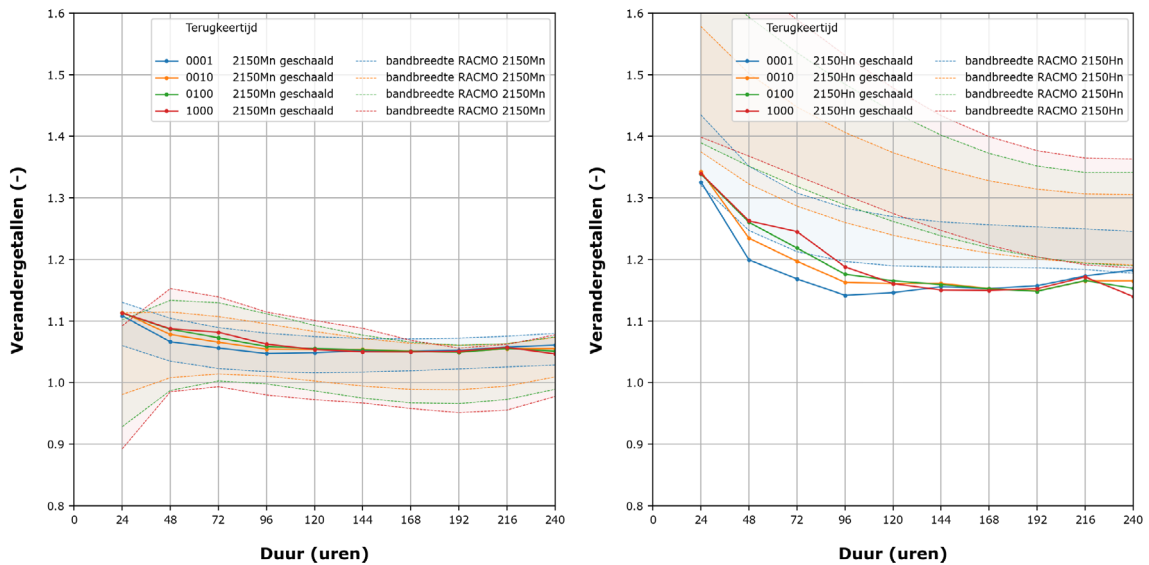
We concluderen hieruit dat de relatieve verandering voor de lage scenario's en voor 2050 in de midden en hoge scenario's moeilijk af te leiden is omdat deze relatief gering is ten opzichte van de onzekerheid. Voor de hoge scenario's in zichtjaar 2150 schatten we in dat de verandergetallen in RACMO minder betrouwbaar zijn en waarschijnlijk te hoog uitvallen. Voor de hoge scenario's in 2100 en de middenscenario's in 2100 en 2150 kunnen we de verandergetallen duidelijker onderscheiden van de onzekerheid. Overeenkomstig hoofdstuk 5 van KNMI (2023) wordt daarom gekozen om de scenario's met 4 graden Celsius opwarming, namelijk 2100 Hn en 2100 Hd, als vertrekpunt te gebruiken voor het afleiden van verandergetallen in de andere klimaatscenario's. Dit gebeurt door de relatieve verandering te

schalen met de globale temperatuurstijging. Hierdoor vallen de getallen voor 2150 Hn en 2150 Hd minder extreem uit en sluiten deze meer aan op de verandergetallen die met de CPM's zijn afgeleid. In de grafieken van Figuur 10 zijn de geschaalde verandergetallen van de scenario's vergeleken met de bandbreedtes die uit de bijbehorende RACMO simulaties volgen. De geschaalde verandergetallen van de scenario's met zichtjaar 2050 (Mn en Hn), 2100 (Mn) en 2150 (Mn) vallen binnen deze bandbreedtes. De geschaalde verandergetallen van scenario 2100 Ln liggen net boven de bovengrens en die van scenario 2150 Hn juist onder de ondergrens. Daarbij moet worden opgemerkt dat de onzekerheid wordt onderschat door deze banden, daarmee zullen deze getallen binnen de grenzen van onzekerheid vallen.

De grafieken van de geschaalde verandergetallen voor de droge scenario's laten ongeveer hetzelfde beeld zien. Deze zijn opgenomen in Bijlage A.1. Voor de winterperiode NDJF zijn dezelfde keuzes gemaakt. In Bijlage A.2 zijn de bijbehorende grafieken van de geschaalde verandergetallen voor de winterstatistiek opgenomen.

FIGUUR 10 MET DE MONDIALE TEMPERAATUURSTIJGING GESCHAALDE VERANDERGETALLEN VOOR DE JAARSTATISTIEK VERSUS DE BANDBREEDTES VAN DE OORSPRONKELIJKE UIT RACMO VERKREGEN VERANDERGETALLEN





2.5.2 RACMO VERSUS CPM'S: DAGELIJKE NEERSLAGSOMMEN

De vraag is hoe goed de RACMO verandergetallen voor de hoge scenario's in het zichtjaar 2100 aansluiten op de getallen die door het KNMI (2023) zijn afgeleid met de CPM's (zie Paragraaf 2.3). Omdat in beide gevallen de overige scenario's en zichtjaren op de hoge scenario's in 2100 zijn gebaseerd, maken we de vergelijking alleen voor 2100 Hd en 2100 Hn. In het bijzonder gaat het om een vergelijking tussen de verandergetallen voor de duur van 1 dag ofwel 24 uur, omdat dit de enige duur is die voor beide bronnen beschikbaar is.

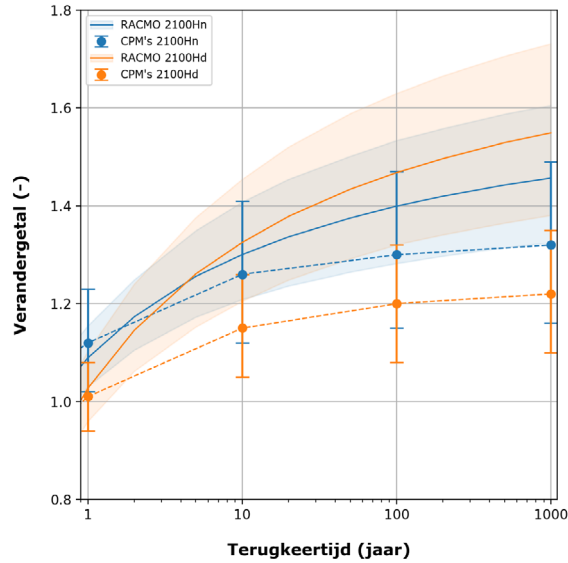
De winter is in de RACMO analyses gedefinieerd als NDJF en in de CPM's is dat DJF. We nemen aan dat het al dan niet toevoegen van de maand november geen groot effect heeft op de verandergetallen en maken voor de winter dus een rechtstreekse vergelijking.

Daarnaast zijn op basis van RACMO verandergetallen voor het gehele jaar afgeleid. Deze zijn niet beschikbaar in KNMI (2023). We hebben daarom met RACMO verandergetallen voor de maanden juni-juli-augustus (JJA) bepaald om een eerlijke vergelijking te maken met de verandergetallen voor JJA in KNMI (2023).

We zien in Figuur 11 dat de RACMO verandergetallen voor de terugkeertijd van 1 jaar goed overeenkomen met die van de CPM's. Voor hogere terugkeertijden liggen de RACMO verandergetallen boven die van de CPM's. Voor het natte scenario liggen de RACMO getallen nog wel binnen de bandbreedtes van de CPM's. Voor het droge scenario is dit niet het geval. Bovendien zien we dat voor de CPM's het verandergetal voor het droge scenario voor alle terugkeertijden kleiner is dan voor het natte scenario. Voor de RACMO verandergetallen zien we dat dit vanaf een terugkeertijd vanaf ongeveer 5 jaar andersom is. Daar spreken de resultaten elkaar dus tegen.

FIGUUR 11

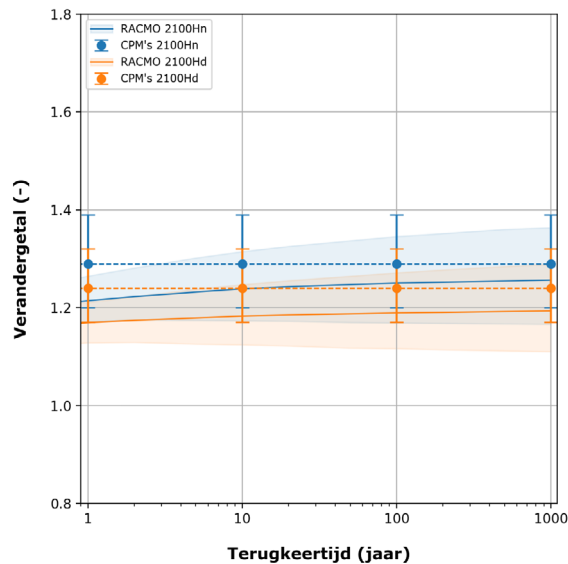
VERANDERGETALLEN 2100 HN EN 2100 HD VOOR DE ZOMER / PERIODE JJA (24 UUR): RACMO VERSUS CPM'S



Beschouwen we de verandergetallen voor de winter bij een duur van 24 uur, dan is in Figuur 12 te zien dat de verandergetallen op basis van de CPM's gelijk zijn voor alle terugkeertijden. Dit geldt bij benadering ook voor de RACMO verandergetallen. Hoewel deze kleiner zijn dan die op basis van de CPM's, geldt dat de bandbreedtes van de verandergetallen van beide methodes overlappen. Daarom concluderen we dat de RACMO verandergetallen voor de winter goed overeenkomen met de verandergetallen op basis van de CPM's. In beide methodes zijn de verandergetallen voor 2100 Hn iets hoger dan voor 2100 Hd.

FIGUUR 12

VERANDERGETALLEN 2100 HN EN 2100 HD VOOR DE WINTER (24 UUR): RACMO (NDJF) VERSUS CPM'S (DJF)



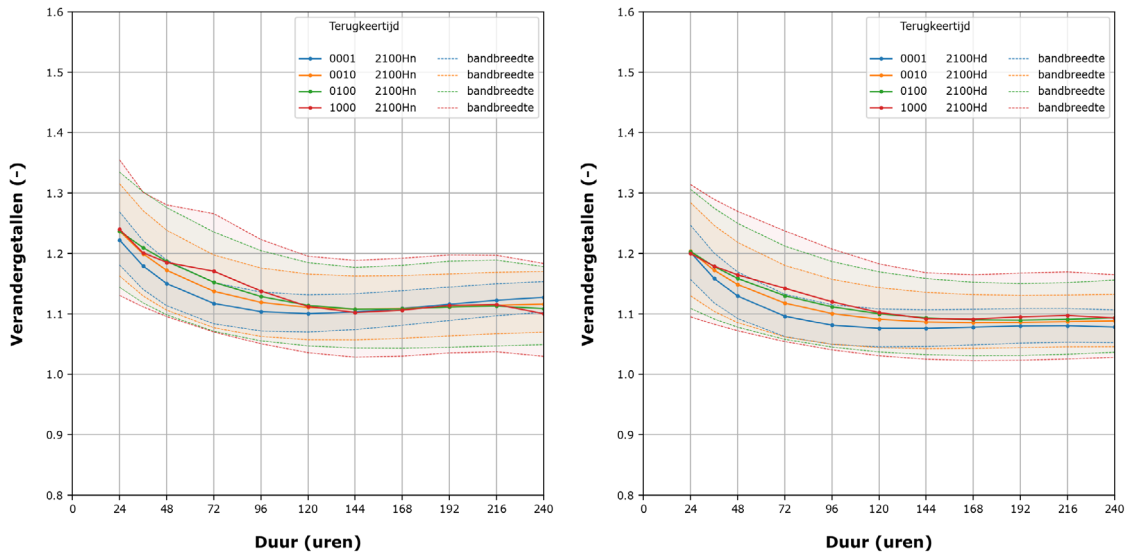
2.5.3 DROOG EN NAT

Tijdens de vergelijking van de verandergetallen gebaseerd op de CPM's en RACMO is vastgesteld dat de methodes elkaar voor de zomermaanden tegenspreken met betrekking tot de verschillen tussen 2100 Hn en 2100 Hd voor een duur van 24 uur. Daarnaast laten de grafieken in Figuur 13 zien dat de verschillen tussen de verandergetallen jaarrond voor alle duren tussen de beide scenario's beperkt blijven tot maximaal 0.05. Dat de verschillen daarmee binnen de onzekerheidsmarges vallen wordt bevestigd door de linker grafiek in

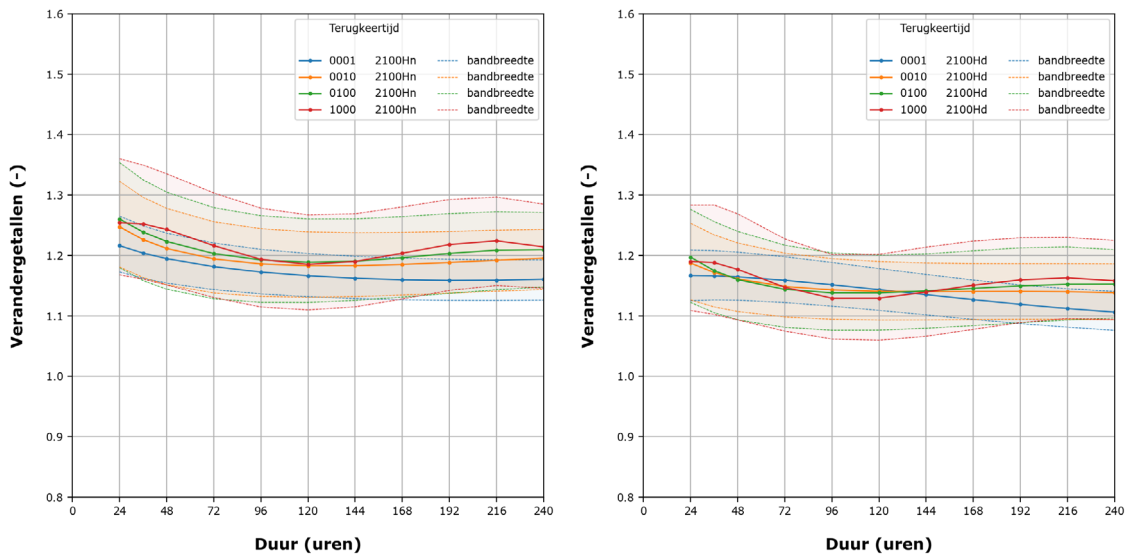
Figuur 15. Voor langere duren zijn de RACMO verandergetallen in beide scenario's ongeveer gelijk aan 1,1. Voor de duur van 24 uur is het verschil ongeveer 0,05.

De grafieken in Figuur 14 laten zien dat voor de winter de RACMO verandergetallen van het scenario 2100 Hn over de gehele linie iets groter zijn dan die van 2100 Hd. Het gemiddelde verschil tussen de RACMO verandergetallen is niet groter dan 0,05; het maximum verschil, bij duren van 24 uur tot en met 96 uur, is iets groter dan 0,05. Uit de rechter grafiek in Figuur 15 blijkt dat de verandergetallen voor 2100 Hd kleiner zijn dan die van 2100 Hn en voor de langere duren net buiten de onzekerheidsmarges van de 2100 Hn verandergetallen vallen.

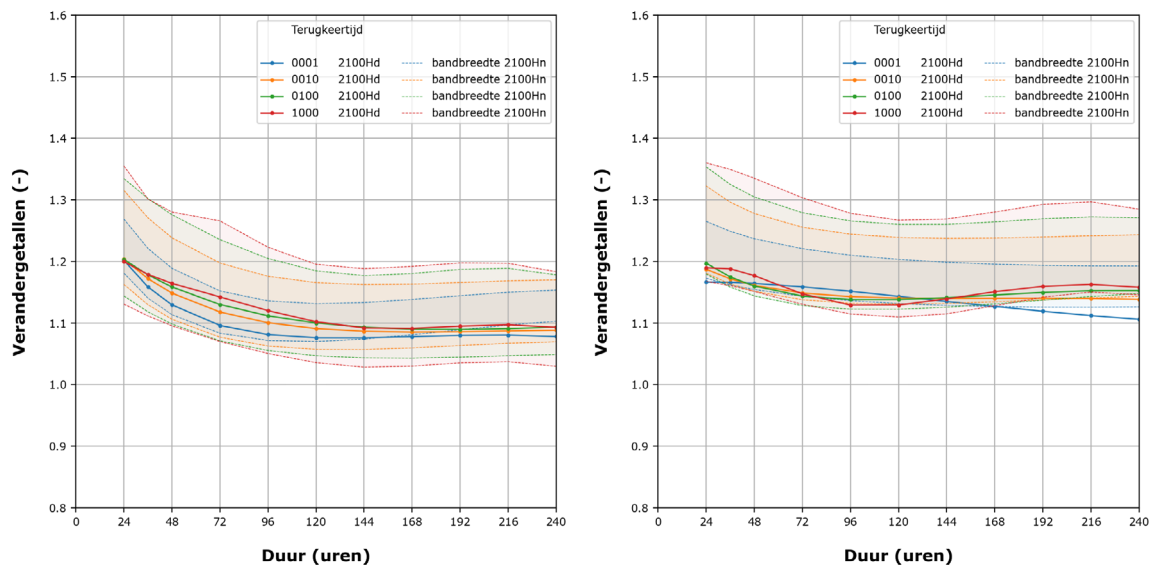
FIGUUR 13 VERANDERGETALLEN JAARROND IN DE SCENARIO'S 2100 HN EN 2100 HD INCLUSIEF BANDBREEDTE



FIGUUR 14 VERANDERGETALLEN WINTERPERIODE NDJF IN DE SCENARIO'S 2100 HN EN 2100 HD INCLUSIEF BANDBREEDTE



FIGUUR 15 VERANDERGETALLEN 2100 HD MET BANDBREEDTES VERANDERGETALLEN 2100 HN (LINKS GEHELE JAAR, RECHTS WINTERPERIODE NDJF)



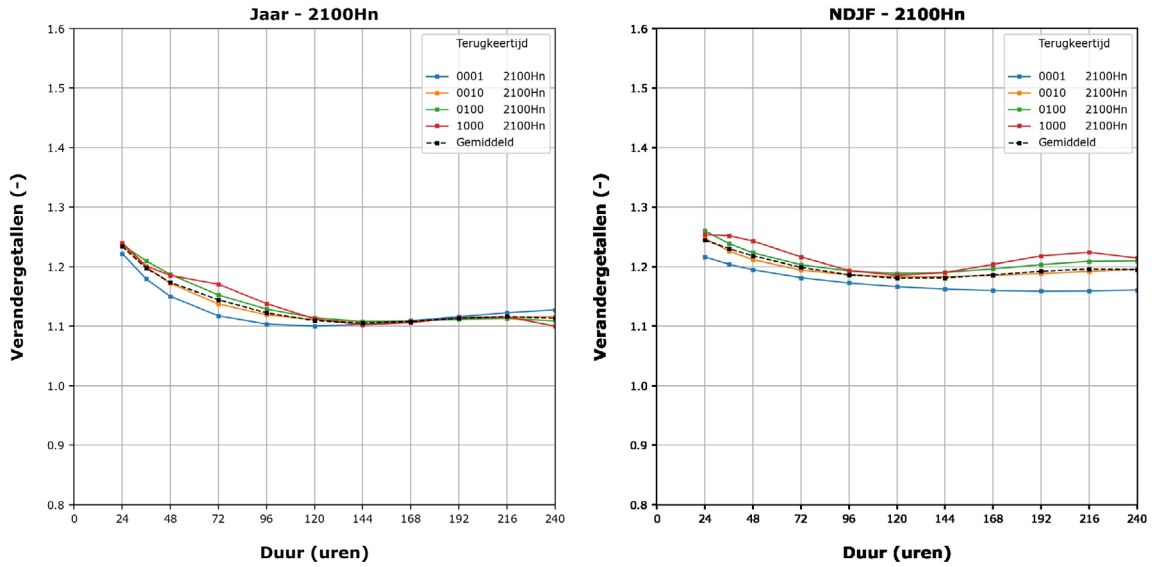
Gezien de tegenstrijdige resultaten in de CPM's en RACMO voor de zomerperiode (voor de duur van 24 uur) en de kleine verschillen ten opzichte van de onzekerheidsmarges, constateren we dat we niet met voldoende zekerheid onderscheid kunnen maken tussen het droge en het natte scenario. Om te voorkomen dat er schijnnaauwkeurigheid wordt gesuggereerd, laten we het onderscheid tussen de 'vernattende' en 'verdrogende' scenario's vallen. Belangrijk is om op te merken dat dit slechts betrekking heeft op de extreme neerslagstatistiek, voor overige kenmerken van klimaatverandering is er wel degelijk onderscheid tussen beide scenario's zoals gepresenteerd door het KNMI. Er is gekozen om te werken met de RACMO verandergetallen uit het vernattende scenario 2100 Hn. Deze keuze is gemaakt omdat:

1. voor dit scenario er betere overeenstemming is tussen de CPM en RACMO verandergetallen,
2. het RACMO model betrouwbaarder wordt geacht voor dit scenario met betrekking tot neerslagextremen dan voor het droge scenario, en
3. deze getallen voor de winter voor alle duuren en voor het gehele jaar voor 24 uur een licht grotere toename geven in extremen en het vernattende scenario daarmee voor neerslagextremen een licht conservatievere (veiligere) benadering is (dan het verdrogende scenario) met het oog op wateroverlaststudies.

2.5.4 TERUGKEERTIJD

In de linker grafieken van Figuur 13 en Figuur 14 in Paragraaf 2.5.3 is te zien dat de uit RACMO afgeleide verandergetallen nauwelijks verschillen over de terugkeertijden, zowel niet voor het gehele jaar als niet voor de winter. Ook deze verschillen liggen binnen de onzekerheidsmarges. De gefitte kansverdelingen schuiven over de gehele linie op naar boven ten opzichte van het huidige klimaat, zodanig dat de relatieve verandering bij een gegeven duur over het gehele bereik van terugkeertijden ongeveer gelijk is. Daarom is besloten dat voor elke duur de gemiddelde waarde van de verandergetallen bij terugkeertijden 1, 10, 100 en 1000 jaar wordt gebruikt (zie Figuur 16). Het resultaat wordt in Figuur 17 in paragraaf 2.5.5 gepresenteerd en vergeleken met waarden uit de kerncijfertabel van de KNMI'23-klimaatscenario's.

FIGUUR 16 VERANDERGETALLEN GEMIDDELD OVER VIER TERUGKEERTIJDEN (LINKS GEHELE JAAR, RECHTS WINTER)



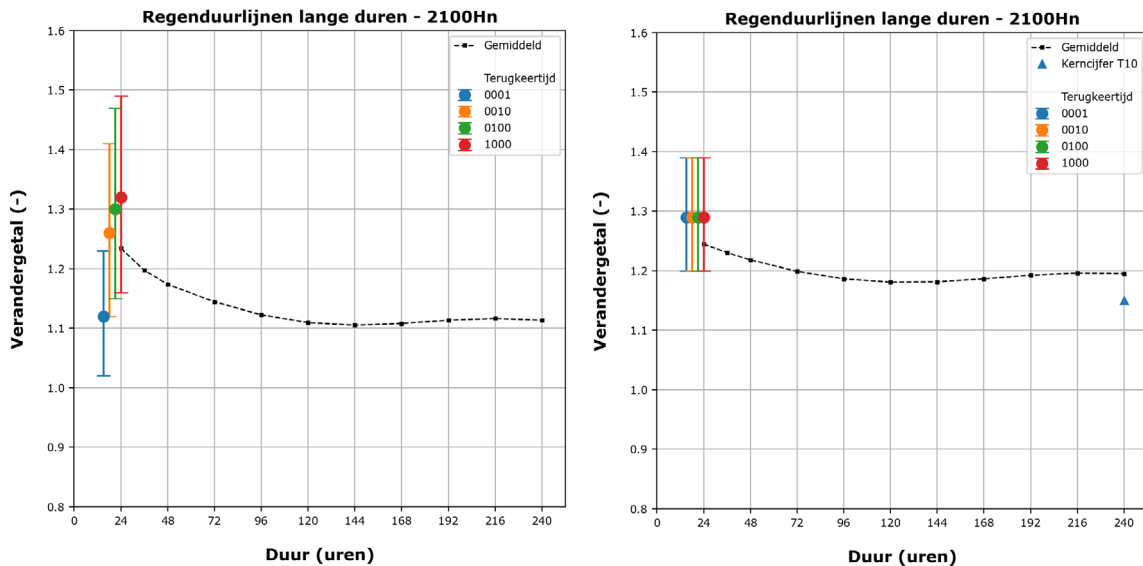
2.5.5 DUUR

Voor de duren vanaf 24 uur tot en met 10 dagen zijn de verandergetallen die zijn afgeleid uit de RACMO reeksen voor 2100 Hn leidend, zowel voor het gehele jaar als de winter. Dit levert een consistent beeld op, waarbij het verandergetal bij 24 uur het grootst is en afneemt naarmate de duur toeneemt.

Voor het gehele jaar dalen de verandergetallen van 1,23 (23% toename) bij 24 uur naar 1,1 (10% toename) bij 5 dagen, om daarna nagenoeg gelijk te blijven voor de duren tot en met 10 dagen (zie linker grafiek in Figuur 17).

Voor de winterperiode dalen de verandergetallen van 1,24 (24% toename) bij 24 uur naar 1,2 (20% toename) bij een duur van 10 dagen (zie rechter grafiek in Figuur 17). De kerncijfertabel van KNMI (2023) geeft een toename van 15% voor de 10-daagse neerslagsom die eens in de 10 winters wordt overschreden in het 2100 Hn scenario. Deze toename is ook in Figuur 17 opgenomen. Dit kerncijfer is gebaseerd op neerslag in het gehele stroomgebied van de Rijn en de Maas, waar deze studie zich baseert op de RACMO simulaties voor De Bilt. We oordelen dat het in deze studie afgeleide veranderpercentage van 20%, gegeven dit verschil in definitie, het getal in de kerncijfertabel voldoende dicht benadert.

FIGUUR 17 VERANDERGETALLEN SCENARIO 2100 HN ALS FUNCTIE VAN DE DUUR. LINKS: JAARROND. RECHTS: WINTER



Voor duren vanaf 10 minuten tot aan 24 uur is besloten de RACMO verandergetallen bij 24 uur te gebruiken. RACMO is niet geschikt om verandergetallen voor sub-dagelijkse extremen af te leiden. Daarbij gelden de volgende overwegingen:

- KNMI (2023) geeft voor de winterperiode (DJF) op basis van CPM's vergelijkbare verandergetallen voor uurlijkse neerslag als voor dagneerslag (Tabel 6). We nemen dus de conclusie uit KNMI (2023) over dat urneerslag in de winter relatief gezien op dezelfde manier verandert als dagneerslag, maar gaan daarbij uit van de uit RACMO afgeleide verandergetallen voor 24 uur voor alle subdagelijkse extremen (10 minuten tot 24 uur).
- De relatieve percentages voor uurlijkse neerslag zijn in KNMI (2023) alleen voor de 4 seizoenen afgeleid, niet voor het gehele jaar. De relatieve verandering in de uurlijkse neerslag in KNMI (2023) is voor de zomerperiode (JJA) iets hoger dan de getallen die voor dagelijkse neerslag zijn afgeleid (Tabel 6). De waarden zijn ook iets hoger dan de verandergetallen die uit RACMO voor 24 uur volgen. We constateren echter dat het verschil in verandergetallen tussen urneerslag en dagneerslag in de zomer (JJA) gepresenteerd in KNMI (2023) veel kleiner is dan de bandbreedtes van deze verandergetallen. Gegeven deze grote onzekerheid, de kleine verschillen en gebrek aan informatie over de verhouding uur- en dagneerslag voor het gehele jaar, besluiten we om ook voor het gehele jaar uit te gaan van de uit RACMO afgeleide verandergetallen voor 24 uur voor alle subdagelijkse extremen (10 minuten tot 24 uur).

Terugkeertijd	Uur (DJF)	Dag (DJF)	Uur (JJA)	Dag (JJA)
1	18 - 39 (28)	20 - 39 (29)	17 - 46 (31)	2 - 23 (12)
10	19 - 41 (30)	20 - 39 (29)	19 - 48 (33)	12 - 41 (26)
100	20 - 43 (31)	20 - 39 (29)	19 - 48 (33)	15 - 47 (30)
1000	20 - 43 (31)	20 - 39 (29)	20 - 49 (34)	16 - 49 (32)

2.5.6 BESCHRIJVING VERANDERGETALLENFUNCTIE EN STATISTIEK KLIMAATSCENARIO'S

De beschreven keuzes in Paragraaf 2.5.1 t/m 2.5.5 liggen ten grondslag aan de uiteindelijke verandergetallen als functie van de duur en mondiale temperatuurstijging. Dit moet uiteindelijk een functie worden waarmee voor alle tussenliggende duren ook de verandergetallen (en dus statistiek) kunnen worden bepaald. De afleiding van de verandergetallenfunctie en daarmee de statistiek van extreme neerslag in de klimaatscenario's wordt hieronder stapsgewijs beschreven.

Vertrekpunt zijn de verandergetallen die zijn afgeleid met RACMO voor 4 graden Celsius temperatuurstijging in het 2100 Hn scenario. Daarbij worden de volgende stappen doorlopen voor het gehele jaar en de winterperiode NDJF:

- GEV-verdeling fitten met maximum likelihood op de jaarmaxima uit de RACMO simulaties bij De Bilt voor 2100 Hn en het referentiescenario. Bij het fitten wordt de vaste, duuraafhankelijke vormparameter uit STOWA (2019) gebruikt.
- Regenduurlijnen opstellen door voor alle terugkeertijden en voor de duren van 1 t/m 10 dagen in stappen van één dag de volumina te bepalen uit de GEV-verdeling. Dit gebeurt voor zowel het 2100Hn- scenario als het referentiescenario.
- Gladstrijken van de regenduurlijnen door *spline smoothing* toe te passen op de volumina per terugkeertijd uit de vorige stap om een glad verloop te krijgen over de duren van 1 t/m 10 dagen. Dit gebeurt zowel voor het 2100Hn-scenario als het referentiescenario.
- De verandergetallen volgen door de volumina uit de gladgestreken regenduurlijnen voor het 2100Hn-scenario te delen door de volumina uit de gladgestreken regenduurlijnen voor het referentiescenario.

- e. Bereken voor iedere duur van 1 t/m 10 dagen met stappen van één dag het gemiddelde verandergetal over de terugkeertijden 1, 10, 100 en 1000 jaar.
- f. Fit een (logaritmisch) kwadratisch polynoom $G(D)$ door de in voorgaande stap berekende gemiddelde verandergetallen bij de duren (D) 24, 48, 72, 96 en 120 uur. Daarmee kunnen de verandergetallen voor alle tussenliggende duren worden bepaald. In stap 2 is de functie $G(D)$ gespecificeerd voor NDJF en jaarrond.
- g. De verandergetallen voor duren van 10 minuten tot en met 24 uur zijn gelijk aan de waarde voor 24 uur (C_1).
- h. Gebruik voor alle duren langer dan 120 uur de waarde bij 120 uur (C_2).

De verandergetallenfunctie $V_{2100Hn}(D)$ voor het klimaatscenario 2100Hn, voor duren D tussen 10 minuten en 240 uur, volgt uit de stappen hierboven. In formulevorm wordt deze gegeven door:

$$= C_1; \quad \text{voor } 1/6 \text{ uur} \leq D \leq 24 \text{ uur}$$

$$V_{2100Hn}(D) = G(D); \quad \text{voor } 24 \text{ uur} < D < 120 \text{ uur}$$

$$= C_2; \quad \text{voor } 120 \leq D \leq 240 \text{ uur}$$

Hierbij zijn $G(D)$, C_1 en C_2 als volgt gedefinieerd voor JAAR en NDJF:

JAAR:

$$\rightarrow C_1 = 1,234$$

$$\rightarrow C_2 = 1,109$$

$$\rightarrow G(D) = 0,009143 * \ln(D)**2 - 0,1508 * \ln(D) + 1,621; \text{ voor } 24 \text{ uur} < D < 120 \text{ uur.}$$

NDJF:

$$\rightarrow C_1 = 1,244$$

$$\rightarrow C_2 = 1,181$$

$$\rightarrow G(D) = 5,952E-06 * D**2 - 1,515E-03 * D + 1,277; \text{ voor } 24 \text{ uur} < D < 120 \text{ uur.}$$

N.B. De functie $G(D)$ is een (logaritmisch) kwadratisch polynoomfunctie van alleen de duur D afgeleid in stap d.

De uiteindelijke verandergetallenfunctie voor klimaatscenario's met een temperatuurstijging T_s volgen door lineair te schalen met de temperatuurstijging uit de verandergetallen voor het scenario 2100 Hn. In dit scenario geldt dat de temperatuur 4 graden Celsius stijgt ten opzichte van de temperatuur in de periode 1990-2020 met als middelste jaar 2005. In de huidige situatie, het jaar 2023, is al sprake van 0,4 graden Celsius opwarming ten opzichte van 2005 (bron: NASA, 2024). Bij het schalen wordt hier rekening mee gehouden:

$$1 + (V_{2100Hn}(D) - 1) * (T_s - 0,4) / (4-0,4).$$

Hierbij is $V_{2100Hn}(D)$ het van de duur D afhankelijke verandergetal voor het scenario 2100 Hn, zoals hierboven gedefinieerd. De temperatuurstijging in ieder klimaatscenario en zichtjaar staat in Tabel 7. Voor het huidige klimaat is het verandergetal gelijk aan 1 voor alle duren. Voor het scenario 2100 Hn is de verandergetalfunctie gelijk aan $V_{2100Hn}(D)$.

Daartussen wordt geschaald met $(T_s - 0.4) / (4-0.4)$, waarbij voor huidig klimaat T_s gelijk is aan 0,4.

TABEL 7 **MONDIALE OPWARMING IN DE VERSCHILLENDE KNMI'23 KLIMAATSCENARIO'S**

Scenario's	Mondiale temperatuurstijging in graden Celsius t.o.v. 2005 (1990-2020)
2023 Huidig klimaat	0,4
2033 L	0,6
2100 Ln, 2100 Ld (idem voor 2050 en 2150)	0,8
2050 Mn, 2050 Md	1,1
2050 Hn, 2050 Hd	1,5
2100 Mn, 2100 Md	1,9
2150 Mn, 2150 Md	2,1
2100 Hn, 2100 Hd	4
2150 Hn, 2150 Hd	5,5

In formulevorm kan de verandergetallenfunctie $F(T_s, D)$ voor een temperatuurstijging T_s tussen 0,4 en 5,5 graden Celsius en duren D tussen 1/6 en 240 uur dus als volgt worden geschreven:

$$F(T_s, D) = 1 + (V_{2100Hn}(D) - 1) * (T_s - 0,4) / (4-0,4); \text{ voor } 1/6 \text{ uur} \leq D \leq 240 \text{ uur}$$

Hierbij zijn T_s de temperatuurstijging van het scenario (in graden Celsius) ten opzichte van het referentiejaar 2005 en D de duur (in uren). Merk op dat het verandergetal niet afhangt van de terugkeertijd.

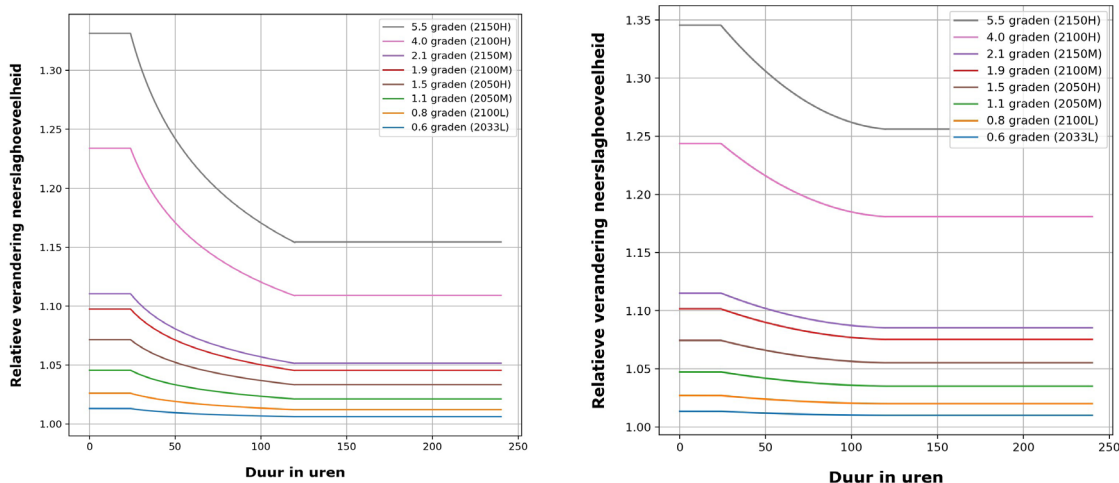
De statistiek voor de klimaatscenario's worden uiteindelijk bepaald als het product van de verandergetallenfunctie en de basisstatistiekfunctie. De basisstatistiekfunctie is een GEV-verdeling of GLO-verdeling, afhankelijk van de duur en de periode jaarrond of winter (STOWA, 2019). Vermenigvuldigen van de verandergetallenfunctie met deze verdelingen is gelijk aan het vermenigvuldigen van de locatieparameter van deze functies, dit is een gevolg van het feit dat de verandergetallen niet van de terugkeertijd afhangen. De kansverdeling van de extreme neerslag in een KNMI'23-klimaatscenario met een temperatuurstijging T_s , bij een bepaalde duur D , wordt daarmee dus verkregen door de locatieparameter van de huidige GEV-verdeling of GLO-verdeling te vermenigvuldigen met de verandergetallenfunctie $F(T_s, D)$.

2.5.7 RESULTERENDE NEERSLAGSTATISTIEK

De verandergetallenfuncties voor het gehele jaar en de winterperiode NDJF zijn in Figuur 18 weergegeven voor de verschillende klimaatscenario's c.q. temperatuurstijgingen. Daarnaast is de neerslagstatistiek voor huidig klimaat en 2100H gegeven voor winter en jaarrond in Tabel 8 t/m Tabel 11. In Figuur 19 zijn de absolute in neerslagvolumina voor het gehele jaar in klimaatscenario 2100 H en huidig klimaat in grafieken getoond voor duren van 1 uur t/m 10 dagen. Figuur 20 toont de overeenkomstige grafieken voor de winterperiode NDJF.

De regenduurlijnen en tabellen voor zowel het gehele jaar als de winterperiode zijn voor alle scenario's en zichtjaren beschikbaar via www.meteobase.nl onder de menuknop "Statistiek".

FIGUUR 18 VERANDERGETALLEN GEHELE JAAR (LINKS) EN DE WINTER (RECHTS) VOOR VERSCHILLENDE KLIMAATSCENARIO'S ALS FUNCTIE VAN DE DUUR



TABEL 8 NEERSLAGSTATISTIEK VOOR HUIDIG KLIMAAT VOOR HET GEHELE JAAR - AFGEROND OP GEHELE MILLIMETERS

T [jaar]	10 min	30 min	60 min	2 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur	2 dagen	4 dagen	8 dagen
0.5	8	10	13	15	19	22	25	30	39	50	68
1	10	13	16	20	23	28	31	37	46	59	79
2	12	17	20	24	28	33	36	44	54	69	90
5	15	21	26	31	36	42	45	54	66	81	105
10	18	25	31	37	43	49	53	63	75	92	116
20	20	30	37	44	51	58	62	73	85	102	127
25	21	32	40	47	54	61	65	76	88	106	131
50	25	38	48	57	65	72	77	87	100	117	141
100	29	46	58	68	78	86	90	99	111	128	152
200	33	55	70	81	89	95	98	112	124	140	163
250	35	58	75	87	94	100	103	117	128	144	167
500	41	70	91	105	112	117	120	132	142	156	178
1000	48	85	111	128	134	138	139	148	157	169	188

TABEL 9 NEERSLAGSTATISTIEK VOOR KLIMAATSCENARIO 2100 H VOOR HET GEHELE JAAR - AFGEROND OP GEHELE MILLIMETERS

T [jaar]	10 min	30 min	60 min	2 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur	2 dagen	4 dagen	8 dagen
0.5	10	13	16	19	23	27	30	37	45	57	76
1	13	17	20	24	29	34	38	45	54	67	88
2	15	20	25	30	35	41	45	54	63	77	100
5	19	26	32	38	44	51	56	67	77	91	117
10	22	31	38	45	53	61	65	78	88	103	129
20	25	37	46	55	63	72	76	90	100	115	141
25	26	39	49	58	67	75	80	94	104	119	145
50	30	47	59	70	80	89	94	107	117	131	157
100	35	57	71	84	96	106	111	122	131	144	169
200	41	68	86	100	109	117	121	138	146	157	181
250	43	72	92	107	116	123	127	144	151	162	185
500	50	87	112	130	138	145	148	163	167	176	197
1000	59	105	137	158	166	171	172	183	185	190	209

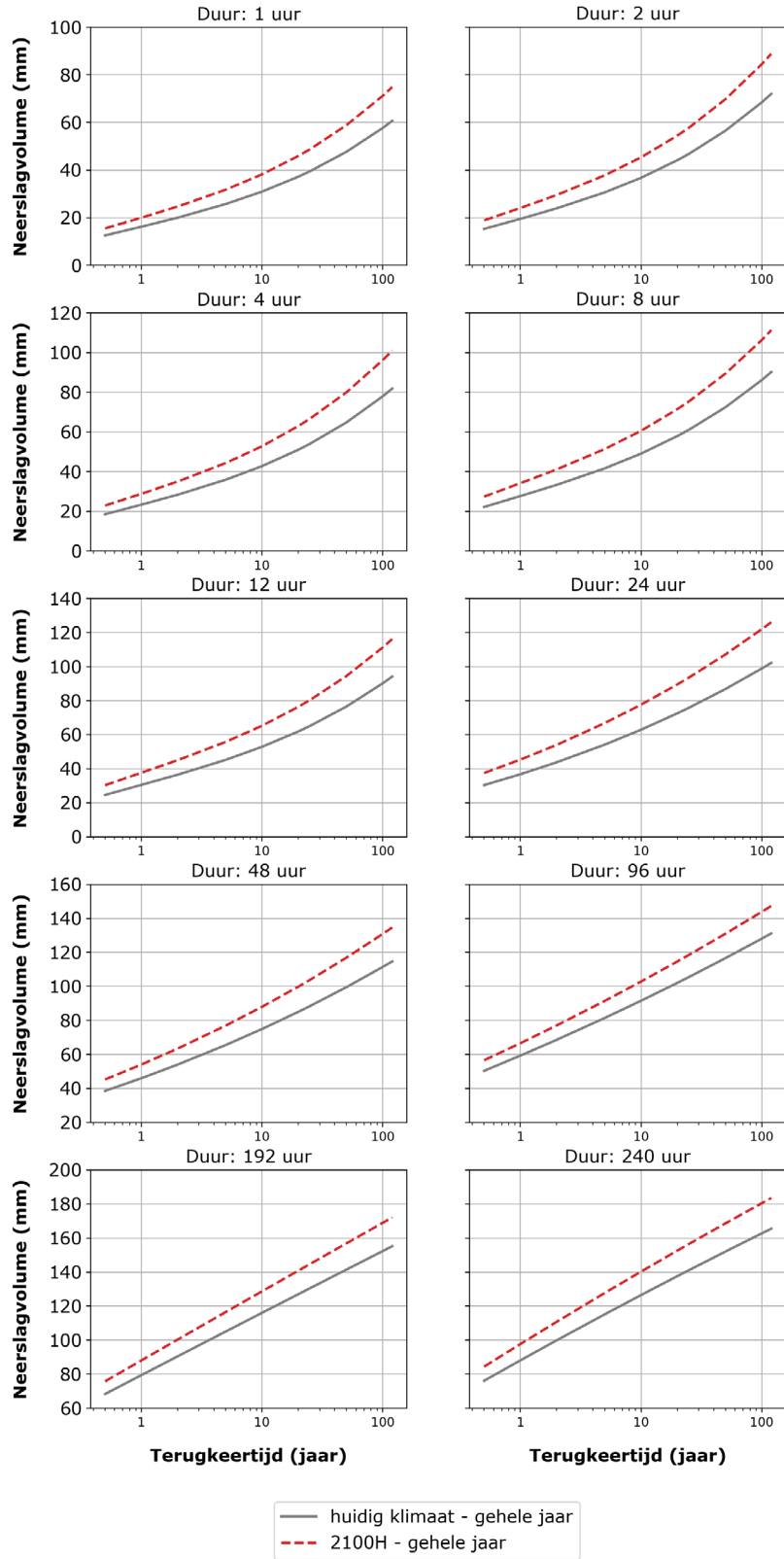
TABEL 10 NEERSLAGSTATISTIEK VOOR HUIDIG KLIMAAT VOOR DE WINTERPERIODE (NDJF) - AFGEROND OP GEHELE MILLIMETERS

T [jaar]	10 min	30 min	60 min	2 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur	2 dagen	4 dagen	8 dagen
0.5	2	4	5	8	10	14	16	22	29	39	55
1	3	5	7	9	13	17	19	26	34	47	66
2	4	6	8	11	15	20	23	30	40	55	76
5	5	7	10	14	18	24	28	36	48	65	89
10	6	9	11	16	21	27	32	41	54	73	99
20	7	10	13	18	24	31	36	46	61	81	109
25	8	10	14	18	24	32	37	47	63	84	111
50	9	12	16	21	27	35	41	53	70	92	121
100	10	14	17	23	30	39	45	59	77	100	129
200	12	15	19	25	33	43	49	64	84	109	138
250	13	16	20	26	34	44	50	66	87	112	140
500	14	18	22	29	37	48	55	73	94	120	149
1000	17	20	25	31	41	52	59	80	102	129	156

TABEL 11 NEERSLAGSTATISTIEK VOOR KLIMAATSCENARIO 2100 H VOOR DE WINTER - AFGEROND OP GEHELE MILLIMETERS

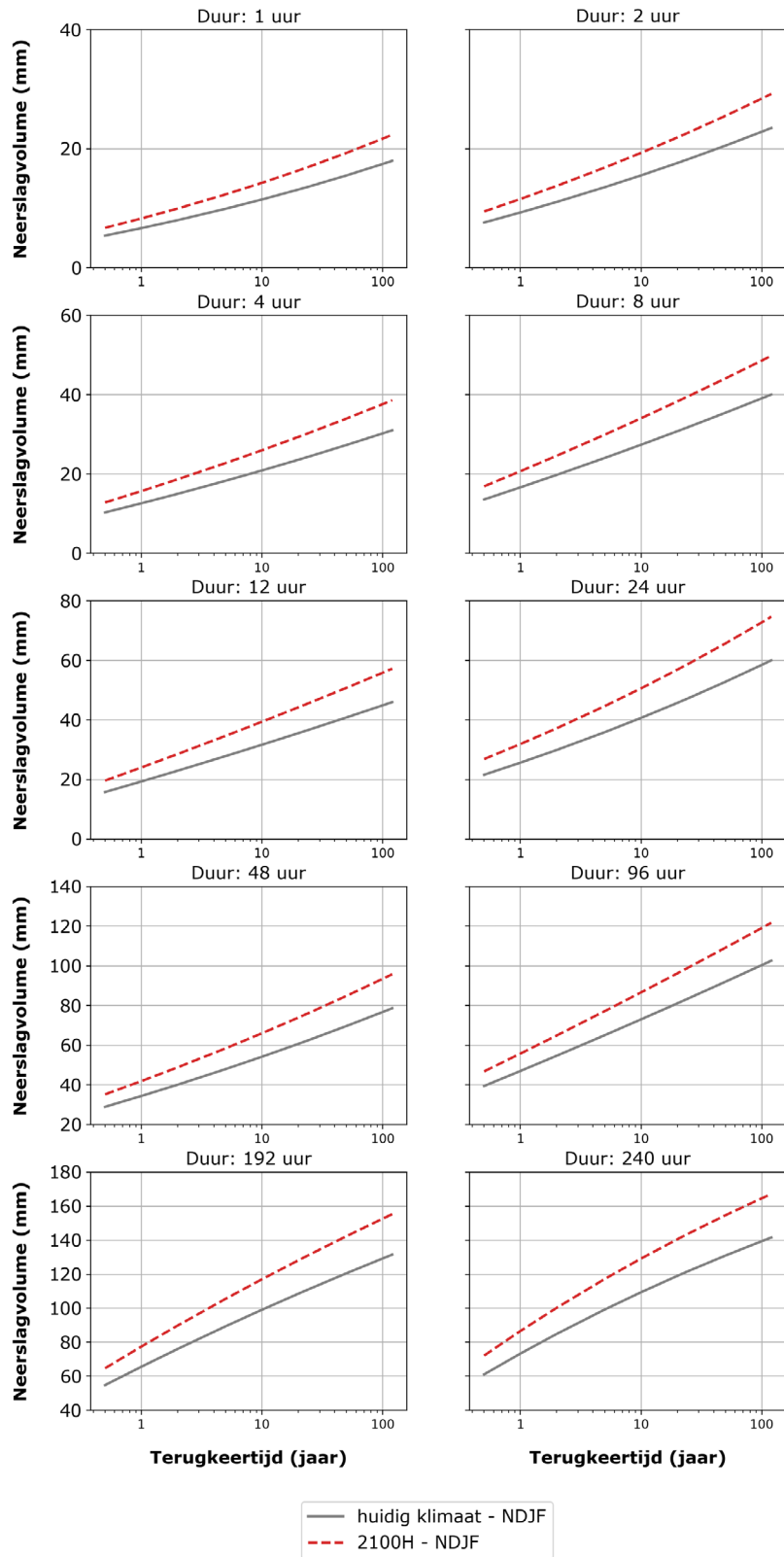
T [jaar]	10 min	30 min	60 min	2 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur	2 dagen	4 dagen	8 dagen
0.5	3	5	7	9	13	17	20	27	35	47	65
1	4	6	8	12	16	21	24	32	42	56	77
2	5	7	10	14	19	25	29	37	49	65	90
5	6	9	12	17	23	30	35	45	58	77	106
10	7	11	14	19	26	34	39	51	66	87	117
20	9	12	16	22	29	38	44	57	74	96	128
25	9	13	17	23	30	40	46	59	77	99	132
50	11	15	19	26	34	44	51	66	85	109	142
100	13	17	22	28	38	49	56	73	93	119	153
200	15	19	24	31	41	53	61	80	102	129	163
250	16	20	25	32	43	55	63	83	105	132	166
500	18	22	28	36	47	60	68	91	115	143	175
1000	21	25	31	39	51	64	73	99	125	153	185

FIGUUR 19 NEERSLAGVOLUMINA KLIMAATSCENARIO 2100 H VOOR VERSCHILLENDE DUREN (JAARROND)



FIGUUR 20

NEERSLAGVOLUMINA KLIMAATSCENARIO 2100 H VOOR VERSCHILLENDE DUREN (NDJF)



2.6 VERANDERINGEN TEN OPZICHTE VAN STATISTIEK UIT STOWA 2019-19

Met dit rapport wordt nieuwe klimaatstatistiek gepresenteerd, passend bij de KNMI'23 scenario's. De basisstatistiek die daaraan ten grondslag ligt is onveranderd ten opzichte van de basisstatistiek zoals gepresenteerd in STOWA (2019) en STOWA (2023). De klimaatstatistiek is wel anders dan de klimaatstatistiek gepresenteerd in STOWA (2019). Tabel 12 presenteert de belangrijkste verschillen in opzet. Zowel in STOWA 2019-19 als in dit rapport zijn functies gegeven voor de basisstatistiek en klimaatstatistiek, waarmee voor iedere duur, terugkeertijd, seizoen en (in geval van de klimaatstatistiek) scenario en zichtjaar het neerslagvolume kan worden bepaald.

TABEL 12 **VERSCHILLEN IN OPZET KLIMAATSTATISTIEK STOWA 2019 EN STOWA 2024**

Klimaatstatistiek STOWA 2019	Klimaatstatistiek STOWA 2024
Gebaseerd op KNMI'14 klimaatscenario's	Gebaseerd op KNMI'23 klimaatscenario's
Zichtjaren: 2030, 2050, 2085	Zichtjaren: 2033, 2050, 2100, 2150
Statistiek voor scenario's voor lange duren (24 t/m 216 uur) voor zichtjaren 2050 en 2085:	Statistiek voor scenario's voor alle duren (10 min t/m 240 uur):
<ul style="list-style-type: none"> • Wh (lower, center & upper) • Wl (lower, center & upper) • Gh (lower, center & upper) • Gl (lower, center & upper) 	<ul style="list-style-type: none"> • Laag • Midden • Hoog
Statistiek voor scenario's voor lange duren (24 t/m 216 uur) voor zichtjaren 2030:	
<ul style="list-style-type: none"> • Wh (lower, center & upper) • Wl (lower, center & upper) • Gh (lower, center & upper) • Gl (lower, center & upper) 	
Statistiek voor scenario's voor korte duren (10 min t/m 24 uur)	
<ul style="list-style-type: none"> • Lower • Upper 	
Statistiek voor seizoenen:	Statistiek voor seizoenen:
<ul style="list-style-type: none"> • Winter (NDJF) • Jaarrond 	<ul style="list-style-type: none"> • Winter (NDJF) • Jaarrond

In Tabel 13 wordt voor de combinaties van duren (1 uur, 24 uur en 9 dagen) en terugkeertijden (10 en 100 jaar) de klimaatstatistiek uit STOWA 2019-19 en uit dit rapport vergeleken. De scenario's zijn in principe niet een-op-een te vergelijken, omdat ze op een andere manier gedefinieerd zijn. Om toch een beeld te krijgen, vergelijken we de laagste en de hoogste scenario's uit STOWA 2019-19 en dit rapport voor de jaren 2030/2033 en 2050. We maken in de vergelijking geen onderscheid tussen 2030 (STOWA 2019-19) en 2033 (dit rapport).

Het is belangrijk om nogmaals op te merken dat er in STOWA 2019-19 een centrale schatting en onder- en bovengrens van statistiek zijn gegeven per scenario voor duren vanaf 24 uur. Voor duren tot 24 uur is alleen een onder- en bovengrens gegeven. In dit rapport is alleen een centrale schatting gegeven voor elk scenario en dus geen onder- of bovengrens. We bekijken daarom

1. hoe de klimaatstatistiek uit dit rapport zich verhoudt tot de bandbreedtes van de klimaatstatistiek uit STOWA (2019), en
2. hoe de statistiek voor het lage (en hoge) scenario in dit rapport zich verhoudt tot de centrale schatting van het laagste (en hoogste) scenario in STOWA (2019).

In alle getallen blijven de statistieken uit deze studie tussen de onder- en bovengrens van STOWA (2019) of maximaal 2mm eronder. Het lage scenario uit deze studie komt over het algemeen goed overeen met de centrale schatting van het laagste scenario uit STOWA (2019). De getallen voor het hoge scenario uit deze studie liggen tussen de 3 en 13% lager dan de centrale schatting voor het hoogste scenario in STOWA (2019), maar blijft wel altijd boven de ondergrens van het hoogste scenario in STOWA (2019). Het verschil in het hoogste scenario is het grootst voor de urneerslag, die voor 2050 11-13% lager uitpakt in het hoogste scenario dan in STOWA (2019). De hoogste scenario's voor de dagneerslag en 9-daagse neerslag vallen 3-5% lager uit.

Het verschil tussen de uurextremen kan met name verklaard worden door het feit dat meer kennis van kortdurende extremen en betere modellen beschikbaar waren voor KNMI'23 dan voor KNMI'14. Er moet wel worden opgemerkt dat dit nog steeds een onderwerp van onderzoek is waar nog veel vragen open staan.

We concluderen dus dat de klimaatstatistiek in dit rapport binnen de marges van de statistiek in STOWA (2019) blijft. Binnen die marges wordt het laagste scenario vrijwel hetzelfde ingeschat, maar wordt het hoogste scenario iets lager ingeschat dan in STOWA (2019). Dat verschil is het grootst voor de uurextremen.

TABEL 13

VERGELIJKING VAN ENKELE CIJFERS IN DE KLIMAATSTATISTIEK VAN STOWA 2019-19 EN DIT HUIDIGE RAPPORT

Jaar	STOWA 2019	STOWA 2024
Duur: 1 uur	2030:	2033:
Terugkeertijd: 10 jaar	32-33 mm	Laag: 31 mm
	2050:	2050:
	32-38 mm	Laag: 32 mm
		Midden: 32 mm
		Hoog: 33 mm
Duur: 1 uur	2030:	2033:
Terugkeertijd: 100 jaar	60-62 mm	Laag: 58 mm
	2050:	2050:
	60-70 mm	Laag: 59 mm
		Midden: 60 mm
		Hoog: 62 mm
Duur: 24 uur	2030:	2033:
Terugkeertijd: 10 jaar	63-66 (65) mm	Laag: 64 mm
	2050:	2050:
	Gl: 64-67 (65) mm	Laag: 65 mm
	Gh: 63-68 (66) mm	Midden: 66 mm
	Wl: 64-73 (69) mm	Hoog: 67 mm
	Wh: 63-72 (67) mm	
Duur: 24 uur	2030:	2033:
Terugkeertijd: 100 jaar	99-105 (103) mm	Laag: 100 mm
	2050:	2050:
	Gl: 100-106 (103) mm	Laag: 101 mm
	Gh: 99-108 (103) mm	Midden: 103 mm
	Wl: 100-116 (109) mm	Hoog: 106 mm
	Wh: 98-114 (105) mm	

Jaar	STOWA 2019	STOWA 2024
Duur 9 dagen (216 uur)	2030:	2033:
Terugkeertijd: 10 jaar	123 - 125 (125) mm	Laag: 122 mm
	2050:	2050:
	Gl: 124-127 (125) mm	Laag: 123 mm
	Gh: 122-129 (126) mm	Midden: 124 mm
	Wl: 123-135 (131) mm	Hoog: 125 mm
	Wh: 123-133 (127) mm	
Duur 9 dagen (216 uur)	2030:	2033:
Terugkeertijd: 100 jaar	159 - 163 (162) mm	Laag: 159 mm
	2050:	2050:
	Gl: 161-165 (163) mm	Laag: 160 mm
	Gh: 159-168 (163) mm	Midden: 161 mm
	Wl: 160-176 (170) mm	Hoog: 163 mm
	Wh: 159-173 (165) mm	

2.7 DISCUSSIE

In deze studie is extreme neerslagstatistiek afgeleid voor de KNMI'23 scenario's. Deze klimaat-scenario's presenteren hoe het klimaat er in de toekomst mogelijk uit komt te zien, afhankelijk van de mondiale opwarming. Voor het afleiden van de statistiek is gebruik gemaakt van de modelberekeningen met RACMO die ten grondslag liggen aan de KNMI'23 scenario's in combinatie met onderzoek van het KNMI naar de verandering in korte duren op basis van CPM.

Bij het afleiden van deze statistiek hebben we te maken met verschillende bronnen van onzekerheid, welke zo goed mogelijk zijn meegewogen bij het afleiden van de neerslagstatistiek. Hieronder bespreken we de belangrijkste bronnen van onzekerheid.

De klimaatscenario's geven zo goed mogelijk weer wat we op dit moment weten van klimaatverandering. Door gebruik van Convection Permitting Models (CPM's) voor het afleiden van de KNMI'23 scenario's, konden veranderingen in subdagelijkse extremen en convectieve neerslag beter worden ingeschat dan bij het afleiden van de KNMI'14 scenario's. Desondanks blijft het effect van klimaatverandering op deze kortdurende extremen onzeker en is het een onderwerp dat meer onderzoek nodig heeft.

Er is in deze studie gekozen de klimaateffecten op neerslagextremen af te leiden uit modelresultaten voor 4 graden mondiale opwarming en lineair te schalen met mondiale opwarming voor de andere scenario's. Daarmee zijn de gebruikte verandergetallen voor het 2150H scenario lager dan blijkt uit de simulaties. Deze keuze is gemaakt omdat de inschatting van het KNMI is dat RACMO de effecten op neerslagextremen bij zeer grote mondiale temperatuurstijging overschat. Hoe extreme neerslag zich ontwikkelt bij 5,5 graden mondiale opwarming zou nader moeten worden onderzocht.

Met de huidige gegevens is geen duidelijk onderscheid te maken tussen extreme neerslagstatistiek voor 'verdrogende' en 'vernattende' klimaatscenario's. De CPM's en RACMO spreken elkaar tegen wat betreft het onderscheid tussen de 'vernattende' en 'verdrogende' scenario's. Mogelijk is bij een volgende versie van de klimaatscenario's ofwel beter bekend of ons klimaat volgens de 'vernattende' of 'verdrogende' scenario's zal veranderen ofwel hoe deze scenario's verschillen met betrekking tot extreme neerslag. In deze studie is er gekozen geen onderscheid tussen de 'verdrogende' en 'vernattende' klimaatscenario's te maken bij

het afleiden van neerslagstatistiek. Dat wil zeggen dat er statistiek is afgeleid voor Laag (L), Midden (M) en Hoog (H) in plaats van Ln, Ld, Mn, Md, Hn en Hd. Bijkomend voordeel is dat het aantal scenario's om uit te kiezen voor wateroverlaststudies verder wordt beperkt.

In de RACMO simulaties is ook weinig onderscheid gevonden tussen de verandergetallen voor verschillende terugkeertijden. Alleen in de simulaties met de hoogste mondiale temperatuurstijging, 2150H, is te zien dat de extremere extremen (terugkeertijden van 100 en 1000 jaar) relatief meer veranderen dan de minder extreme extremen (terugkeertijden van 1 en 10 jaar). In deze studie is er gekozen de effecten te schalen met mondiale temperatuurstijging vanuit de simulaties voor 2100H. Op basis van die simulaties is geen onderscheid te maken in relatieve verandering per terugkeertijd; er is dan ook besloten deze gelijk te veronderstellen over alle terugkeertijden.

Er is net als in eerdere studies gekozen om statistiek voor het gehele jaar en voor de winter te presenteren. Voor sommige toepassingen zal het relevant zijn om statistiek voor het groeiseizoen te gebruiken. In het verleden is geconstateerd dat de statistiek voor het groeiseizoen (maart tot en met oktober) vrijwel gelijk is aan de statistiek van het gehele jaar. Er is in deze studie niet nader getoetst of dit in de toekomst nog steeds het geval is. De jaarstatistiek betreft altijd een bovengrens voor het groeiseizoen en is daarmee een veilige benadering als het gaat om wateroverlaststudies voor het groeiseizoen.

Bij het afleiden van extreme neerslagstatistiek voor de KNMI'14 klimaatscenario's is in STOWA (2015) gekozen om per scenario (Wh, Wl, Gh, Gl) ook statistiek af te leiden voor een bovengrens en ondergrens. Zo bestond er statistiek voor het Wh-scenario met de aanduiding upper, centre en lower. Deze boven- en ondergrens geven de onzekerheid weer die er binnen het scenario is. In de praktijk is gebleken dat de grote hoeveelheid aan varianten verwarrend is voor gebruikers. In veel gevallen werd er per scenario één variant gekozen om mee te rekenen, vaak de centrale schatting of de bovengrens.

Bij het afleiden van statistiek voor de KNMI'23 klimaatscenario's in deze studie voor gekozen per scenario één variant statistiek af te leiden, dus zonder de boven- en ondergrens. Dit maakt de keuze voor gebruikers eenvoudiger en het risico op verkeerde interpretatie van de varianten kleiner. Een keerzijde hiervan is dat onzekerheid binnen één scenario niet in modelberekeningen kan worden meegenomen. Een andere keerzijde is dat voor waterbeheerders die voorheen alleen met een bovengrens rekenden en daarmee kozen voor een conservatieve benadering, de vergelijking tussen statistiek voor KNMI'14 en statistiek voor KNMI'23 niet 1-op-1 te maken is.

2.8 CONCLUSIES

In dit hoofdstuk is de extreme neerslagstatistiek afgeleid voor de KNMI'23 klimaatscenario's voor alle duren tussen 10 minuten en 10 dagen, zowel voor het gehele jaar als voor de winterperiode NDJF.

In alle scenario's zien we toename van extreme neerslag, waarbij de extremen bij korte duren (tot 24 uur) meer toenemen dan de langere duren (vanaf 24 uur). In het lage scenario geldt dat de extremen toenemen tot 2050 en daarna niet verder veranderen. De veranderingen in het midden en hoge scenario blijven tot 2150 doorzetten. Voor de jaarstatistiek zien we in 2150 voor het hoge scenario dat de extremen tot 24 uur met 33% toenemen en voor de lange duren 15%. In het hoge scenario is die toename in 2050 voor duren tot 24 uur ongeveer 7%

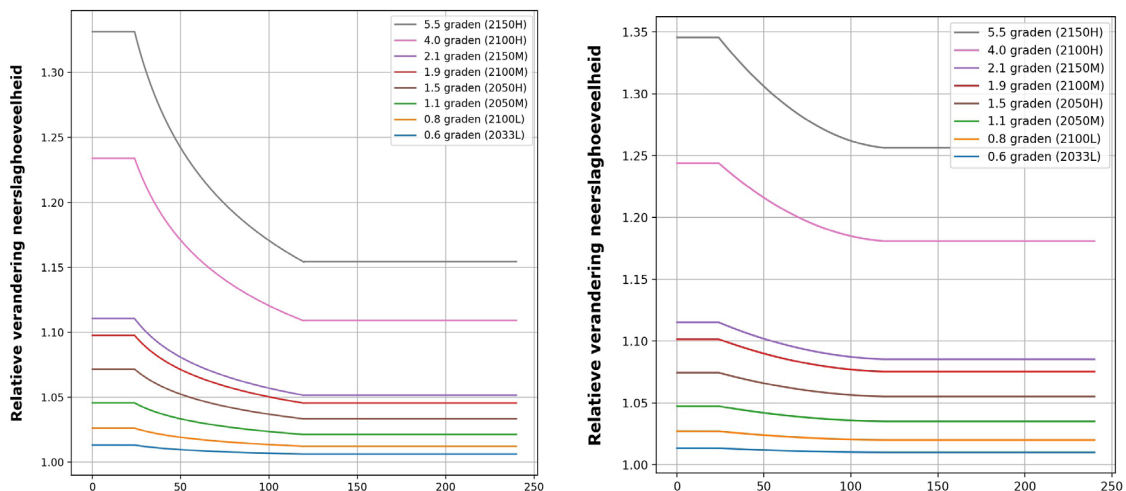
en voor langere duren 3%. In het lage scenario is dat voor alle zichtjaren 2,5% tot 24 uur en iets meer dan 1% voor de langere duren.

De opzet van de klimaatstatistiek in dit rapport is iets veranderd ten opzichte van de klimaatstatistiek in STOWA (2019). De manier van presenteren is vereenvoudigd, omdat de statistiek zowel voor jaarrond als voor de winterperiode NDJF uit 8 tabellen bestaat, namelijk voor de scenario's 2033 L, 2100 L³, 2050 M, 2100 M, 2150 M, 2100 L, 2100 M, 2100 H. Er zijn niet langer boven en ondergrenzen van statistiek gegeven bij de scenario's. Dit werd in STOWA (2019) wel gedaan en resulteerde in 33 tabellen voor de klimaatstatistiek. De reden voor deze vereenvoudiging is dat door gebruikers het aantal keuzen in statistiek om mee te rekenen te groot werd gevonden en dat dit de interpretatie van de resultaten moeilijker maakte.

Het belangrijkste verschil voor de praktijk is, dat waterbeheerders die in het verleden met de bovengrens van het (meestal hoogste) scenario rekenden, deze nu niet meer tot hun beschikking hebben. Wij adviseren in dat geval te rekenen met de getallen uit het (hoge) scenario, dit geeft de beste schatting van de neerslagstatistiek die past bij dat KNMI'23 scenario. Deze getallen zullen over het algemeen lager uitpakken dan de bovengrens van het (hoogste) scenario in STOWA (2019). Wie de voorkeur geeft te rekenen met extremere statistiek dan het (hoogste) klimaatscenario, kan uiteraard besluiten met extremere waarden te rekenen dan hier gepresenteerd.

We hebben de getallen van de klimaatstatistiek uit dit rapport vergeleken met die uit STOWA (2019). Daaruit volgt dat de statistiek in dit rapport binnen de bandbreedte (laagste en hoogste waarden) van de klimaatstatistiek in STOWA (2019) blijft. Dat betekent dat de conclusies in dit rapport de conclusies van STOWA (2019) herbevestigen. Binnen die bandbreedte wordt het laagste scenario vrijwel hetzelfde ingeschat. Wel wordt binnen die bandbreedte het hoogste scenario iets lager ingeschat dan in STOWA (2019). Dat verschil is het grootst voor de extremen tot 24 uur.

In de praktijk zullen de verschillen tussen analyses met KNMI'14 en KNMI'23 scenario's klein zijn, voor zowel het hoge als het lage scenario. Uiteraard is er wel een verschil voor gebruikers die gebruik maakten van de boven- en ondergrenzen van de scenario's, deze zijn binnen deze studie niet langer bepaald. Wij adviseren gebruikers het lage en het hoge scenario te gebruiken om de bandbreedte van klimaateffecten in beeld te brengen.



3 De scenario's 2050 L en 2150 L kennen dezelfde mondiale temperatuurstijging als het scenario 2100 L (0,8 graden Celsius)

3

NEERSLAG- EN VERDAMPINGSREEKSEN

Naast neerslagstatistiek voor huidig klimaat en de klimaatscenario's zijn net als voorheen, in bijvoorbeeld STOWA (2015) en STOWA (2019), ook langjarige neerslag- en verdampingsreeksen beschikbaar gesteld voor huidig klimaat en ieder klimaatscenario. Deze reeksen worden gebruikt voor het doorrekenen van hydrologische modellen om watersystemen te toetsen. De reeksen voor neerslag en verdamping voor huidig klimaat zijn gebaseerd op metingen bij De Bilt vanaf 1906 tot en met 2014. In deze studie zijn de reeksen voor huidig klimaat verlengd tot en met 2022 en zijn ook klimaatreeksen gegenereerd die passen bij de KNMI'23 scenario's.

In Paragraaf 3.1 beschrijven we het verlengen en de klimaattransformatie van de neerslagreeks, in Paragraaf 3.2 hetzelfde voor de verdampingsreeksen. In Paragraaf 3.3 gaan we in op het gebruik van de reeksen en tot slot volgen discussie en aanbevelingen.

Vanwege de correcties en detrending wordt bij de reeks voor huidig klimaat niet langer gesproken over een meetreeks of een reeks bij De Bilt. In STOWA (2015) wordt gesproken over *Basisreeks 2014*. In STOWA (2019) en STOWA (2023) wordt gesproken over *Referentiereeks*. In dit rapport sluiten wij daarop aan en duiden we de reeksen voor huidig klimaat aan met *Referentiereeks 2023*.

3.1 NEERSLAGREEKSEN

De meetreeks van De Bilt van 1906 t/m 2014 is in verschillende stappen bewerkt tot de referentiereeks die uiteindelijk in STOWA (2019) is gepresenteerd. We benoemen kort deze stappen, maar verwijzen naar de genoemde eerdere rapporten voor details:

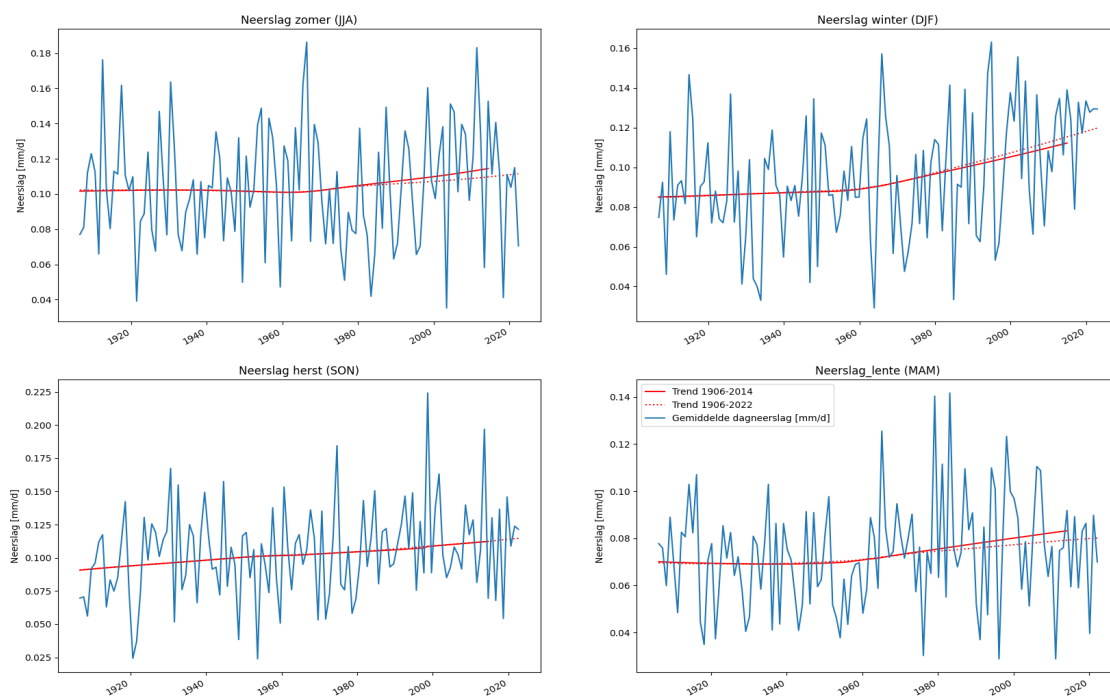
- Correctie van uurmetingen bij De Bilt van het automatische weerstation (station nr 260) aan de hand van dagmetingen met de handregenmeter bij De Bilt (station nr 550). (STOWA, 2015)
- Homogenisatie van uurwaarden om te corrigeren voor de gewijzigde opstelling van de handregenmeter bij De Bilt in 1946 en 1973. (STOWA, 2015)
- Detrenden van de uurwaarden om de reeks representatief te maken voor het klimaat rond 2014. (STOWA, 2015)
- Correctie van de kortdurende extremen in de reeks consistent te maken met statistiek gepresenteerd in STOWA (2019). (STOWA, 2019)

In STOWA (2023) is de reeks verlengd met metingen van 1 januari 2015 tot en met 31 december 2022. Op deze metingen is in STOWA (2023) dezelfde correctie aan de hand van dagwaarden toegepast als in STOWA (2015). Homogenisatie was niet opnieuw nodig omdat er geen wijziging in de opstelling heeft plaatsgevonden sinds 2014. In dit onderzoek voeren we detrending uit de reeks in zijn geheel (1906 t/m 2022) volgens dezelfde methode als in STOWA (2015). Tot slot voeren we een correctie op de kortdurende extremen uit, zoals in STOWA (2019). Op basis van de verlengde, gedetrende en gecorrigeerde neerslagreeks bepalen we klimaatreeksen met behulp van de transformatietool van het KNMI (KNMI, 2023).

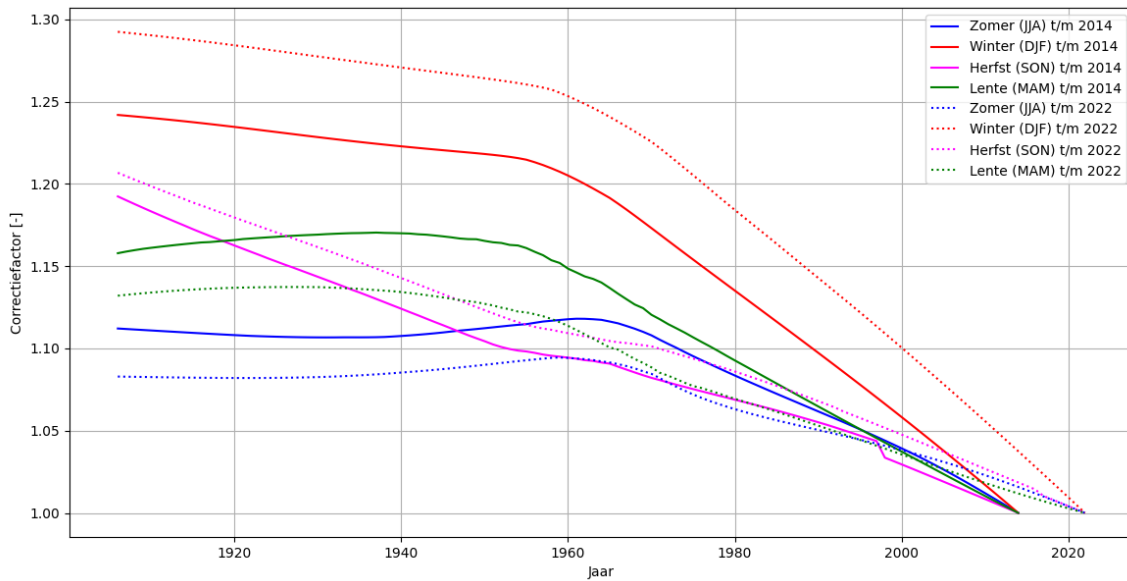
3.1.1 VERLENGING EN DETRENDING NEERSLAGREEKS

We bepalen de trend voor de reeks van 1906 t/m 2022 op dezelfde manier als in STOWA (2015), namelijk door een Loess fit (degree=1, family=Gaussia, span=0.9) te bepalen voor de dagsommen per seizoen (DJF, MAM, JJA, SON) voor de dagsommen. De trendcorrectiefactor per jaar en per seizoen is gegeven in Figuur 21 en Figuur 22 voor de reeks t/m 2014 (doorgetrokken lijn) en voor de reeks t/m 2022 (gestippelde lijn).

FIGUUR 21 GEMIDDELDE DAGNEERSLAG PER SEIZOEN. DE RODE LIJNEN ZIJN HET RESULTAAT VAN LOESS FITS (DEGREE=1, FAMILY=GAUSSIA, SPAN=0.9) VOOR DE PERIODE 1906-2014 (DOORGETROKKEN LIJN) EN 1906-2022 (GESTIPPELDE LIJN)



FIGUUR 22 CORRECTIEFACTOREN ZOALS AFGELEID VAN DE LOESS FITS (FIGUUR 21) PER SEIZOEN VOOR DE PERIODE 1906-2014 (DOORGETROKKEN LIJNEN) EN 1906-2022 (GESTIPPELDE LIJNEN)



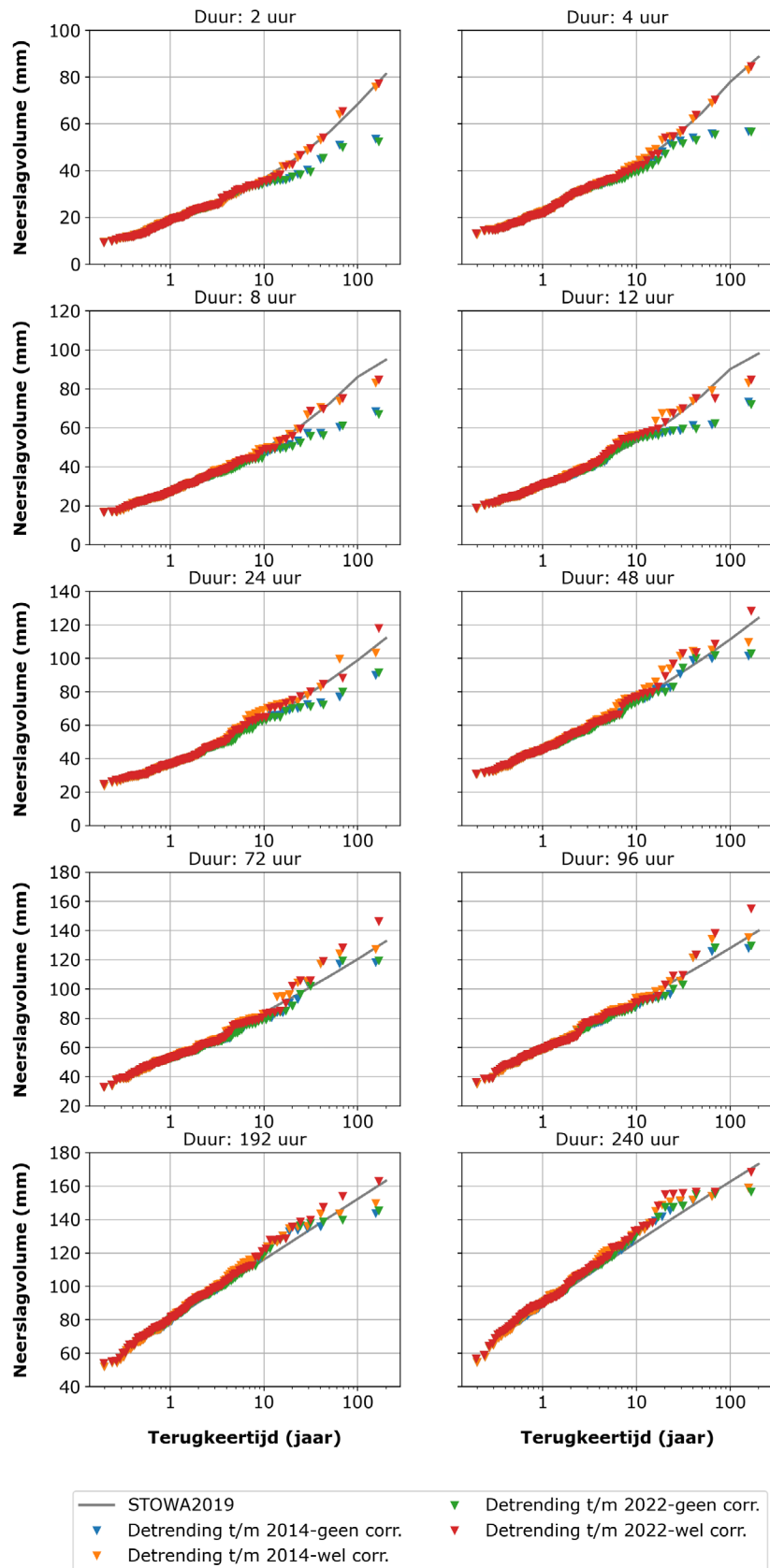
In alle seizoenen blijft een stijgende trend aanwezig in de neerslag, te zien aan de correctiefactor groter dan één in alle historische jaren. Het grote aantal droge lentes en zomers in de periode vanaf 2015 heeft een duidelijk effect, in zowel zomer als lente is de trend minder sterk wanneer ook de periode 2015-2022 wordt meegenomen ten opzichte van de trend op basis van de reeks tot en met 2014. Bij gelijke trend, neemt de correctiefactor (Figuur 22) toe als de lengte van de reeks langer wordt. Dit is dan ook zichtbaar voor de winter en herfst. Voor de zomer en de lente wordt dit effect gecompenseerd door de veel minder sterke trend die volgt uit de droge zomers en voorjaren sinds 2018, en neemt de correctiefactor voor het begin van de reeks dus af ten opzichte van de correctiefactor op basis van de reeks t/m 2014.

3.1.2 CORRECTIE KORTE DUREN NEERSLAGREEKS

In STOWA (2019) bleek dat de hoogste extremen bij korte duren onder de statistiek voor korte duren ligt. Dit is mogelijk doordat de korte duren statistiek op andere metingen gebaseerd is, namelijk op basis van de automatische weerstations door heel Nederland. Om de reeks representatief te maken voor de statistiek van huidig klimaat gepresenteerd in STOWA (2019), zijn de hoogste 5 extremen zodanig aangepast dat ze overeenkomen met de statistiek voor korte duren. De methode wordt in STOWA (2019) stapsgewijs beschreven. In deze studie hebben we dezelfde methode toegepast op de verlengde reeks. Figuur 23 geeft voor de duren 1 uur, 2 uur, 4 uur en 8 uur de statistiek voor huidig klimaat evenals de jaarmaxima uit de

- gedetrende reeks,
- gedetrende en voor korte duren gecorrigeerde reeks.

FIGUUR 23 OVERZICHT VAN DE GEDETRENDE REEKSEN MET EN ZONDER CORRECTIE VOOR DETRENDING TOT EN MET 2014 EN TOT EN MET 2022 VOOR EEN AANTAL DUREN



3.1.3 TRANSFORMATIE NAAR KLIMAATREEKSEN NEERSLAG

Bij de transformatie van de historische reeks wordt het klimaateffect dat afgeleid is uit de KNMI'23 scenario's toegepast op elke tijdstap, zie Paragraaf 2.5.1 in KNMI (2023) voor een gedetailleerde omschrijving. De huidige transformatie wijkt op een aantal punten af:

- De extremen boven het 99% percentiel zijn niet getransformeerd volgens de oorspronkelijke KNMI'23 klimaatsignalen, maar zoals deze zijn gepresenteerd in dit rapport. Dit betekent dat het *gemiddelde* klimaatsignaal van natte en droge scenario's wel verschillen, maar de extremen (boven het 99% percentiel) niet.
- Omdat de oorspronkelijke transformatietool met verandergetallen per maand werkt, en in dit rapport alleen het onderscheid tussen jaar en winter wordt gemaakt zijn de verandergetallen per maand toegepast zoals weergegeven in Tabel 14. Deze getallen zijn terug te vinden als de constante C1 in Paragraaf 2.5.6. Voor de maanden Maart, April en Mei zijn geen verandergetallen gefixeerd boven het 99% omdat de jaarextremen niet uit deze maanden komen, en er daarmee een onnodige sprong wordt geïntroduceerd bij de overgang van de verandergetallen vanuit de KNMI'23 verandergetallen rond de 99%.
- De uurlijkse waarden zijn verkregen uit de getransformeerde dagwaarden, door per dag de procentuele verandering tussen de oorspronkelijke reeks en de getransformeerde reeks af te leiden en deze toe te passen op elk van de 24 uurwaarden voor die betreffende dag. Daarmee wordt geïmpliceerd dat voor de uurwaarden hetzelfde verandergetal geldig is als voor de dagwaarden; iets wat ook aangenomen is in Paragraaf 2.5.6.

TABEL 14 GEFIXEERDE VERANDERGETALLEN BOVEN HET 99% PERCENTIEL PER MAAND

Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1.244	1.234	-	-	-	1.244	1.244	1.244	1.244	1.244	1.234	1.234

3.2 ERDAMPINGSREEKSEN

Voor toepassingen in het waterbeheer is het gewenst om naast de lange neerslagreeks te beschikken over een verdampingsreeks die representatief is voor het klimaat van nu en voor de toekomst. De verdampingsreeks bevat referentiegewasverdamping volgens Makkink berekend aan de hand van globale straling en temperatuur. Voor de periode tot 1957 zijn geen metingen van globale straling beschikbaar bij De Bilt. In STOWA (2013) is daarom voor de periode 1906 t/m 1957 de globale straling geschat op basis van inkomende kortgolvlige straling, zonneshijnduur en etmaalgemiddelde temperatuur. In STOWA (2015) is de verdampingsreeks gedetrend door de onderliggende reeks van globale straling (geschat voor 1906 t/m 1957 en gemeten voor 1957 t/m 2014) en temperatuur te detrenden.

In deze studie verlengen we de reeks met metingen van globale straling en temperatuur van 2015 t/m 2022. Ook voor verdamping geldt dat de detrending opnieuw gedaan voor de gehele reeks van 1906 t/m 2022, volgens de methode in STOWA (2015).

3.2.1 DETRENDING TEMPERAATUUR- EN STRALINGSREEKS

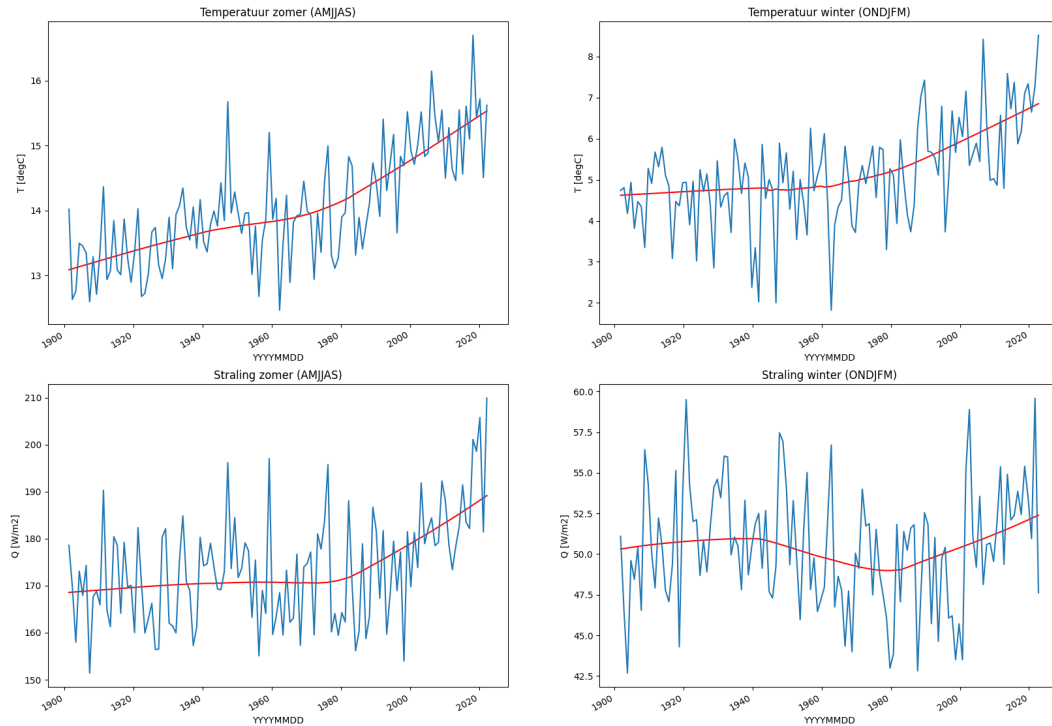
Voor het detrenden van de verdampingsreeks gaan we uit van dezelfde uitgangspunten als in STOWA (2015):

- We beschouwen de trend per winter- en zomerhalfjaar (respectievelijk de maanden ONDJFM en AMJJAS);
- We detrenden de onderliggende variabelen globale straling en 2m-temperatuur apart en berekenen daaruit via de Makkink-vergelijking de referentiegewasverdamping;
- We berekenen de trend via een Loess-filter met dezelfde parameters: vorm Gaussische vorm, graad 1 en een spanwijdte van 2/3.

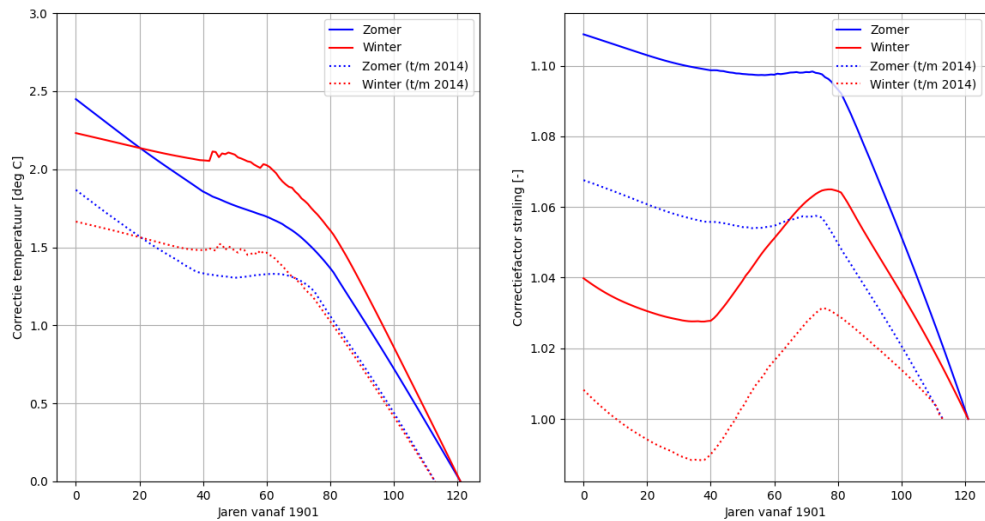
- We kappen de straling *niet* af op basis van de clear-sky-radiation aangezien er dan teveel (niet onrealistische) waarden worden afgekapt. In STOWA (2015) werd een maximum van 0.77 maal de clear-sky-radiation aangehouden. De reeks wijkt daarmee dus iets af van de reeks uit STOWA (2015).

Vervolgens zijn met het Loess filter de trends bepaald in de zomer- en winterhalfjaren voor zowel straling als temperatuur. De gevonden trends zijn te zien in Figuur 24 en de daarvan afgeleide correctiefactoren in Figuur 25 en Figuur 26.

FIGUUR 24 TRENDS DIE ZIJN IN BEREKEND IN K_{GL} EN T PER HALFJAAR (DATA T/M 2022). BOVEN TEMPERAATUUR, ONDER STRALING. LINKS ZOMER, RECHTS WINTER

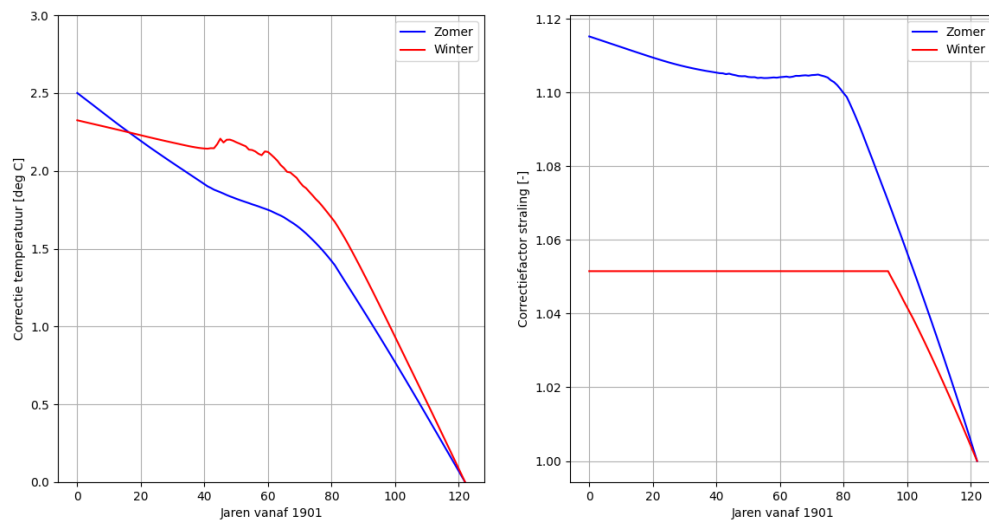


FIGUUR 25 CORRECTIEFACTOREN REEKSEN T/M 2022 (DOORGETROKKEN) EN T/M 2014 (GESTIPPELD): LINKS TEMPERAATUUR, RECHTS STRALING



Op basis van Figuur 25 concluderen we dat de correctiefactor die volgt uit de temperatuur trend vooral in de zomer ruim 0,5 graad hoger is dan in STOWA (2015) doordat de jaren sinds 2014 vooral in de zomer zonder uitzondering warm waren. STOWA (2015) veronderstelde geen trend voor straling in de winter. De berekende trendfactor voor de winter in Figuur 26 voor de periode tot 2014, schommelde rond 1 en is daarom constant 1 genomen over de gehele reeks. In de nieuwe resultaten is de trend weliswaar klein, maar aanwezig. De golfbeweging in de tweede helft van de 20^{ste} eeuw wordt waarschijnlijk veroorzaakt door global dimming en brightening en ook deels door het gebruikte Loess-filter. We kiezen er daarom voor om, net als in STOWA (2019), voor die periode de correctiefactor gelijk te stellen aan het gemiddelde over die periode (1906 t/m 2001). Daarna daalt de correctiefactor langzaam naar 0.

FIGUUR 27 ALS FIGUUR 25, MAAR NU IS DE CORRECTIEFACTOR VOOR STRALING IN DE WINTER VOOR DE EERSTE 95 JAAR GELIJK GESTELD AAN HET GEMIDDELDE IN DIE PERIODE



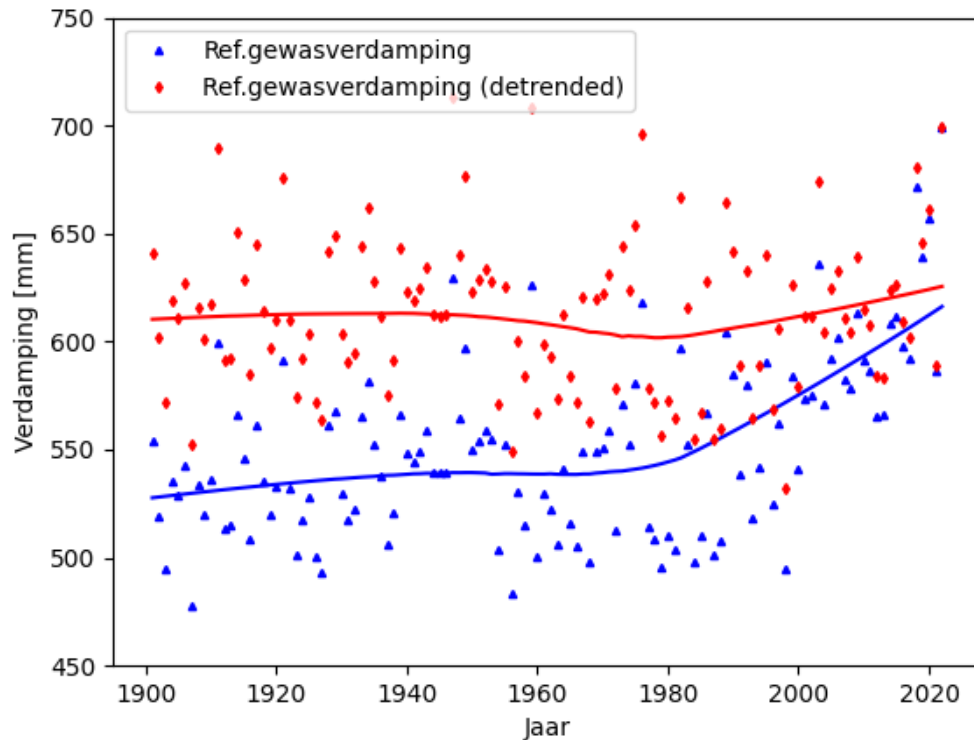
We constateren dus dat de temperatuur van 1906 t/m 2022 meer is gestegen dan van 1906 t/m 2014 en hebben de gehele reeks dus aangepast om representatief te zijn voor het jaar 2023. Ook de straling in de zomer bleef toenemen tussen 2014 en 2022. Daarnaast is nu ook een stijgende trend zichtbaar voor de straling in de winter, waar deze in STOWA (2019) nog constant werd verondersteld op de schommeling na die waarschijnlijk door het *brightning and dimming effect* wordt veroorzaakt.

3.2.2 BESCHOUWING VERDAMPINGSREEKS

Uit de gedetrende straling- en temperatuurreeks bepalen we aan de hand van Makkink de referentiegewasverdamping. We vergelijken de jaarsommen uit die reeks met die van de referentiegewasverdamping van de niet gedetrende reeks. We constateren op basis van Figuur 25 dat er in de reeks op basis van gedetrende gegevens ook voor resulterende verdamping nauwelijks nog een trend aanwezig is.

FIGUUR 28

JAARSOMMEN VAN DE REFERENTIEGEWASVERDAMPING IN DE BILT (1906-2022) VOOR DE OORSPRONKELIJKE REEKS EN DE GEDETRENDE REEKS TOT EN MET 2022. DE GLADDE CURVES ZIJN HET RESULTAAT VAN EEN LOESS-FIT (DEGREE=1, FAMILY=GAUSSIAN, SPAN=2/3)



3.2.3 TRANSFORMATIE NAAR KLIMAATREEKSEN TEMPERATUUR- EN STRALING

De transformatie van de dagreeksen voor temperatuur en straling zijn volledig conform de beschrijving in KNMI (2023) uitgevoerd.

3.2.4 BEREKENING KLIMAATREEKSEN VERDAMPING

De dagelijkse Makkink verdamping voor de klimaatreeksen is berekend aan de hand van de getransformeerde reeksen van temperatuur en straling.

3.3 GEBRUIK VAN DE REEKSEN

De neerslag- en verdampingsreeksen kunnen gebruikt worden voor tijdreeksanalyse of hydrologische modellering. De reeksen voor huidig klimaat zijn aangevuld op metingen gebaseerde gegevens t/m 2022, daarmee is een langere reeks beschikbaar van 117 jaar voor huidig klimaat. De reeksen zijn geen meetreeks, want ze zijn immers gecorrigeerd en gedetrend, maar komen wel voort uit metingen. De neerslagreeks is representatief voor de statistiek van huidig klimaat.

Op basis van de reeksen van huidig klimaat zijn voor ieder scenario en zichtjaar ook klimaatreeksen gegenereerd. Deze zijn representatief voor de neerslag en verdamping in dat klimaatscenario. De neerslagreeksen passen bovendien bij de statistiek van extreme neerslag bij dat scenario en zichtjaar.

Naast deze getransformeerde klimaatreeksen zijn ook modelresultaten van RACMO voor de klimaatscenario's beschikbaar. In de volgende paragraaf gaan we in de verschillen daartussen en adviseren we welke in elke situatie het kan worden ingezet.

3.3.1 KLIMAATREEKSEN VERSUS RACMO-REEKSEN

Naast de getransformeerde neerslag- en verdampingsreeksen gegenereerd met de transformatietool, zijn ook de modelresultaten van RACMO gesimuleerd voor de KNMI'23 scenario's beschikbaar op uurbasis voor neerslag bij De Bilt en op dagbasis voor verdamping. Voor ieder klimaatscenario én voor huidig klimaat zijn reeksen van 240 jaar beschikbaar. Zoals eerder beschreven past de transformatietool een aantal relevante aspecten van klimaatverandering toe op de reeks van huidig klimaat. Daarmee verschillen de reeksen uit de transformatietool op verschillende punten van de RACMO simulaties. We zetten de verschillen op een rij:

- In de getransformeerde reeksen zijn slechts een deel van de aspecten van klimaatverandering meegenomen, terwijl de RACMO-simulaties direct weergeven hoe het klimaat volgens RACMO verandert. De transformatie van de reeksen verandert nauwelijks wanneer het regent, slechts hoeveel het dan regent. Een veranderend klimaat kan ook gepaard gaan met juist langere periodes van regen of droogte, dat zit wel in de RACMO simulaties, maar wordt niet door de getransformeerde reeksen weergegeven.
- In de getransformeerde reeksen kunnen kenmerkende historische jaren met hun 'toekomstige' variant worden vergeleken. De RACMO simulaties hebben geen relatie met historisch opgetreden jaren.
- De getransformeerde neerslagreeksen sluiten aan bij de extreme neerslagstatistiek, in de RACMO simulaties kan die statistiek afwijken.

Als een gebruiker geïnteresseerd is in (extreme) neerslaggebeurtenissen en bijbehorende hoeveelheden, raden we aan de getransformeerde tijdreeksen te gebruiken. Ook wanneer een gebruiker een specifiek historisch jaar in context van toekomstig klimaat wil plaatsen, bijvoorbeeld de natte winter van 1998 of de droge zomer van 2018, kunnen de getransformeerde reeksen gebruikt worden. Wanneer een gebruiker meer geïnteresseerd is veranderende weerpatronen voor een langere periode, bijvoorbeeld een lange natte of juist droge periode, raden we aan de RACMO simulaties te gebruiken.

4

NEERSLAGGEBEURTENISSEN STEDELIJK GEBIED

In STOWA (2019) zijn neerslaggebeurtenissen voor stedelijk gebied geselecteerd uit 10-minutenmetingen voor het doorrekenen van hydrologische modellen voor snelreagerende stedelijke oppervlaktewatersystemen. In gebieden waar voorgeschiedenis een beperkte rol spelen, zoals stedelijke systemen, kunnen deze gebeurtenissen worden gebruikt voor het afleiden van waterstandstatistiek. Daarnaast is in STOWA (2024) een set van 12 gebeurtenissen gepresenteerd om alleen de waterstanden en inundaties bij herhaaltijden van 10, 25, 50 of 100 jaar kunnen worden bepaald.

Er zijn drie sets neerslaggebeurtenissen beschikbaar via Meteobase:

- Een set van 64 gebeurtenissen, waarmee waterstanden en inundaties met terugkeertijden hoger dan 22 jaar kunnen worden bepaald (zie STOWA (2019)).
- Een set van 27 gebeurtenissen, waarmee waterstanden en inundaties met terugkeertijden hoger dan 45 jaar kunnen worden bepaald (zie STOWA (2019)).
- Een set van 12 gebeurtenissen, waarmee met 3 gebeurtenissen de waterstanden en inundaties bij een terugkeertijd van 10, 25, 50 óf 100 jaar kan worden bepaald (zie STOWA (2024)).

Voor de manier waarop deze selecties tot stand zijn gekomen en hoe daarmee waterstanden en inundaties kunnen worden bepaald verwijzen we naar de betreffende documentatie.

Aangezien de statistiek voor huidig klimaat niet is veranderd ten opzichte van STOWA (2019), is er aan deze sets ook niets veranderd. Wel zijn deze sets aangepast om ze consistent te maken met de toekomststatistiek afgeleid in dit rapport. We beschrijven nu de wijze waarop deze zijn aangepast.

De sets van gebeurtenissen bestaan volledig uit gebeurtenissen die minder vaak dan eens per jaar voorkomen. We passen daarom dezelfde factoren toe als we gebruiken om de statistiek voor huidig klimaat te vertalen naar de statistiek voor toekomstig klimaat. Deze factoren zijn voor verschillende duren gepresenteerd in Figuur 18 in Hoofdstuk 2. De gebeurtenissen hebben allemaal een maximale duur van 24 uur. De factoren voor duren tot 24 uur zijn constant per scenario en zichtjaar. We passen de desbetreffende factor toe op alle 10-minuten tijdstappen van de gebeurtenis. Tabel 14 geeft de betreffende factor aan.

De resulterende gebeurtenissen zijn, net als de gebeurtenissen voor huidig klimaat, te downloaden op [Meteobase.nl](https://meteobase.nl).

TABEL 14 FACTOREN VOOR NEERSLAGGEBEURTENISSEN IN VERSCHILLENDE KLIMAATSCENARIO'S

Klimaatscenario	Factor
2033 L	1.013
2100 Ln, 2100 Ld (idem voor 2050 en 2150)	1.026
2050 Mn, 2050 Md	1.046
2050 Hn, 2050 Hd	1.071
2100 Mn, 2100 Md	1.097
2150 Mn, 2150 Md	1.111
2100 Hn, 2100 Hd	1.234
2150 Hn, 2150 Hd	1.331

5

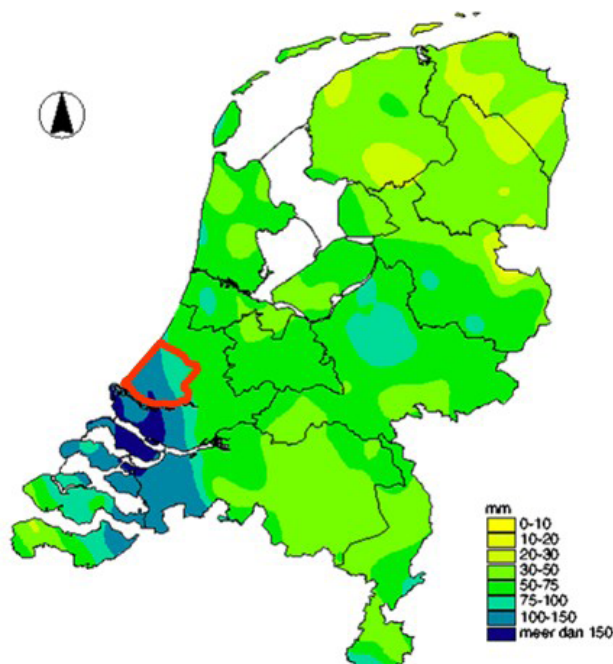
GROOTSCHALIGE NEERSLAGGEBEURTENISSEN

5.1 INLEIDING

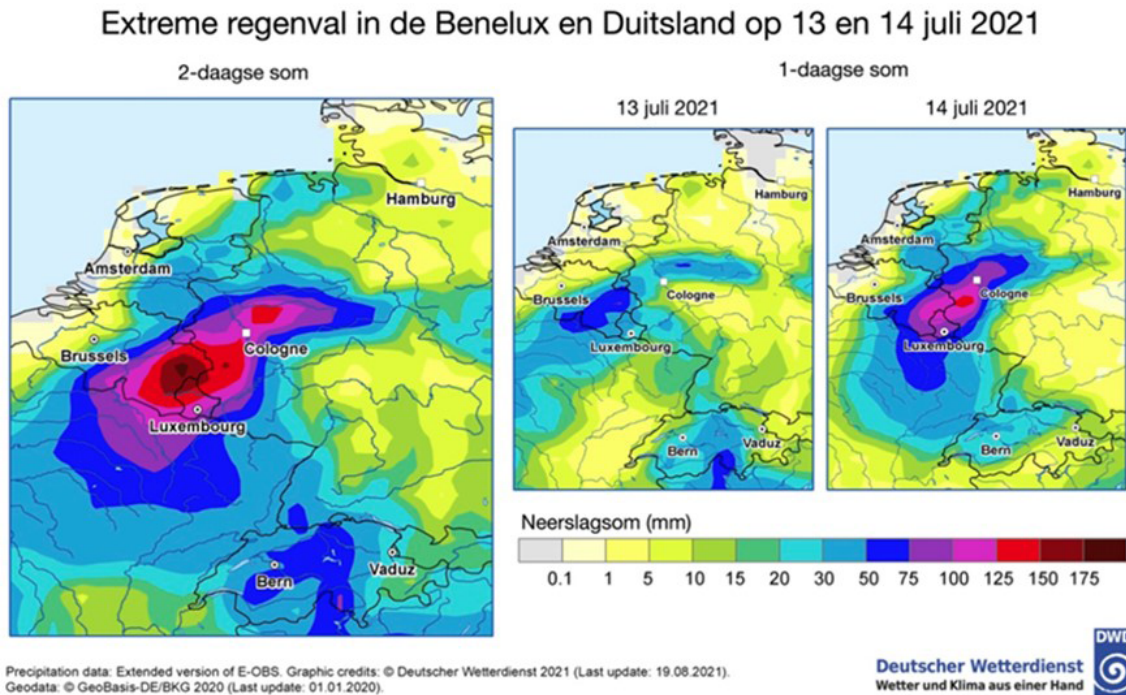
De neerslagstatistiek die we in het kader van dit onderzoek hebben ontwikkeld heeft vooral als toepassing het normeren en toetsen van watersystemen. De neerslaggebeurtenis van 13 en 14 juli 2021 boven de Ardennen en Duitsland heeft ons geleerd dat ook neerslaggebeurtenissen kunnen voorkomen die ons verrassen doordat ze zo extreem zijn dat we daar niet op voorbereid zijn. Dit is door de minister middels het eindadvies van de Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater dan ook vertaald naar het uitvoeren van bovenregionale stresstesten, om beter voorbereid te zijn op dergelijke gebeurtenissen. De juli '21 bui is de basis van deze bovenregionale stresstesten.

De juli '21 bui werd gekenmerkt door de grootte van het neerslaggebied en de intensiteit van de neerslag (waardoor in een groot gebied extreem veel neerslag viel over meerdere dagen). Het weerpatroon was een lage drukgebied dat afgesnoerd was van de straalstroom en daardoor bleef rondtollen. In september 1998 leidde een rondtollend lage drukgebied ook tot extreme meerdaagse neerslag over een groot gebied (deels boven zee). Beide gebeurtenissen deden zich voor in de zomer. De afbeeldingen van de neerslaggebieden zijn weergegeven in Figuur 29 en Figuur 30.

FIGUUR 29 NEERSLAG 12-15 SEPTEMBER 1998 (NIET WEERGEGEVEN IN DE DATA IS DAT HET NEERSLAGGEBIED ZICH UITSTREKTE TOT OP DE NOORDZEE EN IN VLAANDEREN EN DUS VEEL GROTER WAS DAN DE FIGUUR SUGGEREERT. BRON: KNMI)



FIGUUR 30 DE JULI 2021 NEERSLAGGEBEURTENIS. BRON: DWD 2021



De vraag die met de afgeleide klimaatstatistiek voor de KNMI'23 nog niet beantwoord is, is of grootschalige extreme gebeurtenissen zoals juli 2021 en september 1998 vaker gaan voorkomen als gevolg van klimaatverandering. In feite is de vraag of naast een toename in intensiteit van neerslaggebeurtenissen, klimaatverandering ook effect zal hebben op de ruimtelijke schaal van neerslaggebeurtenissen.

In STOWA (2019) zijn gebiedsreductiefactoren geïntroduceerd waarmee puntstatistiek vertaald kan worden naar gebiedsstatistiek. Die gebiedsreductiefactor is een factor afhankelijk van de volgende factoren: 1) duur van de neerslag, 2) oppervlak van het beschouwde gebied en 3) herhalingstijd van het neerslagvolume. De vraag hiervoor betreft dus eigenlijk de vraag of deze gebiedsreductiefactoren aan verandering onderhevig zijn of naar verwachting zullen veranderen in de toekomst.

In dit hoofdstuk onderzoeken we of grootschalige gebeurtenissen zoals de juli '21 bui vaker voorkomen in de RACMO simulaties voor toekomstig klimaat. Dit is een analyse ter verkenning, die wordt gevolgd door aanbevelingen voor nader onderzoek in Paragraaf 5.4.

5.2 ANALYSE

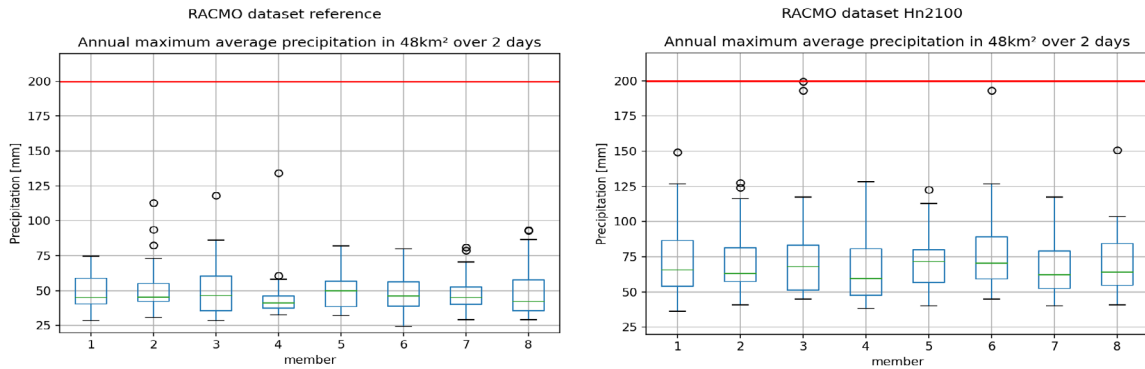
In juli 2021 werden grote delen van Limburg, Duitsland en België getroffen door extreme regenval, waarbij in een groot gebied 150-200 mm in 48 uur tijd viel. In de bovenregionale stresstesten die het komende jaar voor heel Nederland zullen worden uitgevoerd, wordt uitgegaan van 200 mm neerslag in 48 uur over een gebied van 50x50 km². Binnen deze analyse onderzoeken we hoe vaak een dergelijke gebeurtenis voor komt in de RACMO simulaties binnen het Rijn-Maas stroomgebied. We analyseren de RACMO simulaties voor het huidige klimaat en het 2100 Hn klimaatsscenario, welke bestaan uit 8 ensembleleden die elk 30 jaar simuleren, dus totaal 240 jaar. Omdat de gridcellen van RACMO 12x12 km² zijn, werken we in deze analyse met 48x48 km² vensters die we telkens 12x12 km² verschuiven.

We tellen voor een schuivend venster alle gebiedsgemiddelde 48uursommen en nemen dan voor iedere dag in de reeks de hoogste uit het gehele domein.

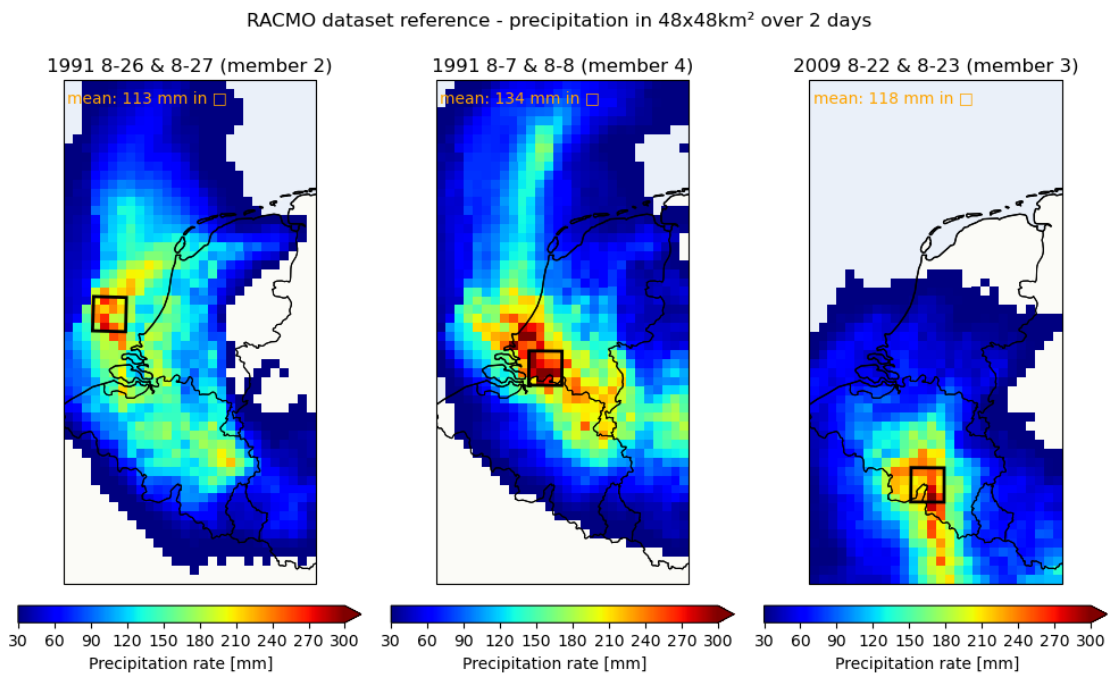
Figuur 27 weergeeft de resultaten in boxplots per ensemblelid, die de spreiding van de gemiddelde neerslag geeft in de 30 jaar simulaties. De boxplot bestaat uit het minimum (onderste zwarte streep), het eerste kwartiel (onderkant blauwe box), de mediaan (groene streep), het derde kwartiel (bovenkant blauwe box), de bovengrens (zwarte bovenste streep) en de uitschieters (bolletjes). Daarnaast is ook middels een rode lijn de bovengrens voor de (tweedaagse) neerslag weergegeven die in de bovenregionale stresstesten wordt gebruikt, gebaseerd op de juli '21 bui. In het linker paneel zijn de resultaten voor huidig klimaat weergegeven en in het rechter paneel voor 2100 Hn.

Binnen de 240 jaar aan simulaties voor het huidige klimaat zien we dus geen gebeurtenissen die qua intensiteit en omvang vergelijkbaar zijn met de juli '21 bui. Dit is als verwacht, omdat de terugkeertijd op 300 tot 1000 jaar geschat is (Tradowsky J, Philip S Y, Kreienkamp F, et al, 2023). De 240 jaar hier getoond komen weer voort uit 1040 jaar simulaties voor huidig klimaat. Ook in die 1040 jaar, werd geen gebeurtenis gevonden die de 200mm per 48 uur oversteege in 48x48 km².

FIGUUR 31 EXTREME TWEEDAAGSE GEBIEDSGEMIDDELTE NEERSLAG VOOR EEN 48KMx48KM GEBIED VOOR HUIDIG KLIMAAT (LINKS) EN HN-KLIMAATSCENARIO 2100 (RECHTS)

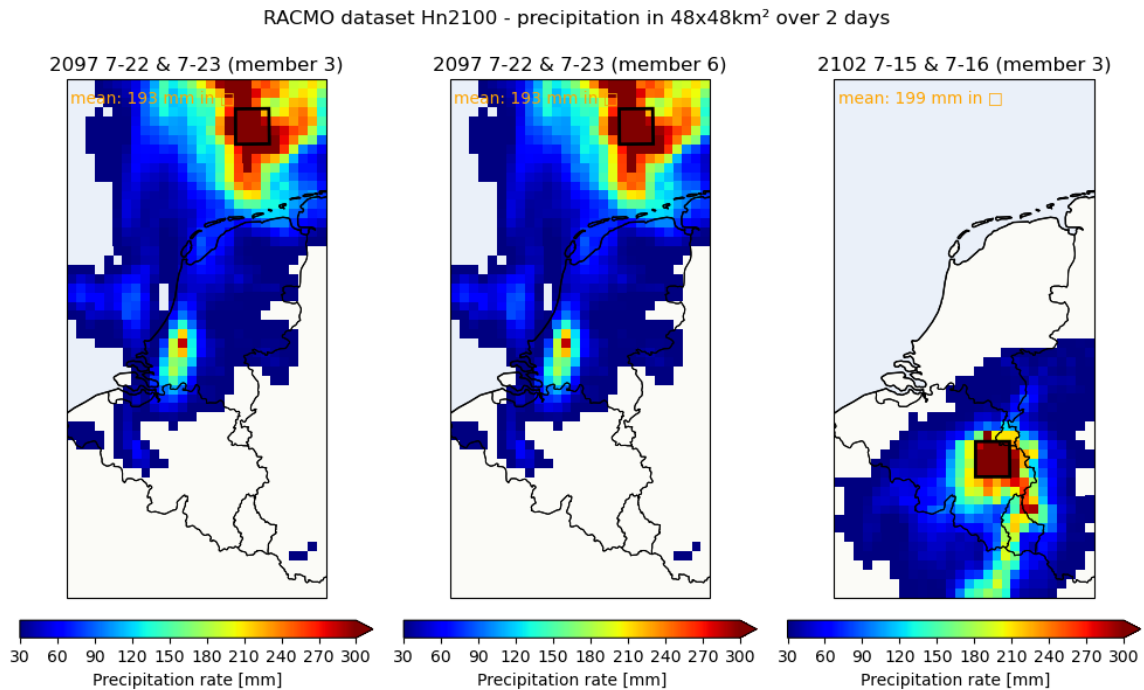


FIGUUR 32 RUIMTELIJKE WEERGAVE VOOR DE DRIE MEEST EXTREME TWEEDAAGSE GEMIDDELTE NEERSLAG WAARDES VOOR 48x48 KM2 BINNEN HET HUIDIGE KLIMAAT



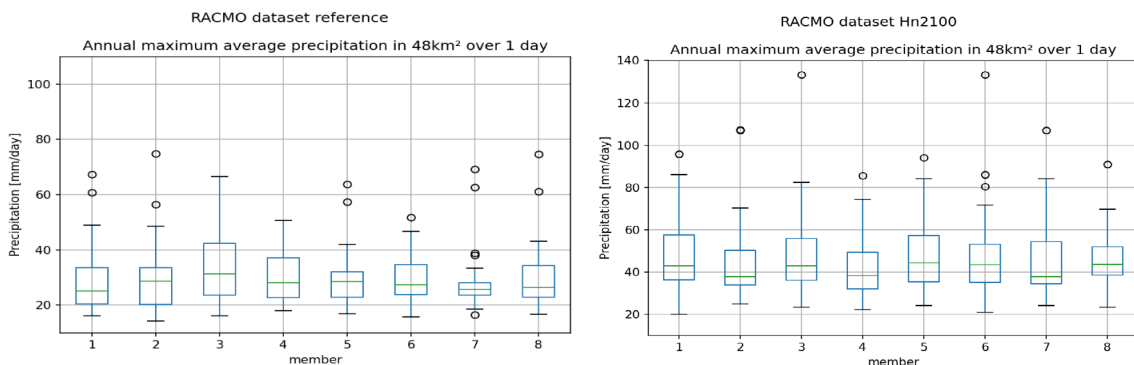
Binnen de 240 jaar simulaties voor het 2100 Hn scenario zien we in Figuur 27 drie gebeurtenissen die rond de 200 mm per 48 uur liggen. Daarnaast zijn er 2 gebeurtenissen die rond de 150 mm in 48 uur liggen. Hierbij moet worden opgemerkt dat de gebeurtenis met 193 mm in 48 uur in member 3 dezelfde is als die in ensemble 6, dat vertekent het beeld enigszins. Dat is te zien in Figuur 29, die het ruimtelijk beeld geeft van de 3 grootste 2-daagse sommen in de simulaties voor huidig klimaat. Voor meer uitleg over de totstandkoming van de 240 jaar simulaties in RACMO, verwijzen we naar KNMI (2023).

FIGUUR 33 RUIMTELIJKE WEERGAVE VOOR DE DRIE MEEST EXTREME TWEEDAAGSE GEMIDDELTE NEERSLAG WAARDES VOOR 48x48 KM² VOOR 2100HN



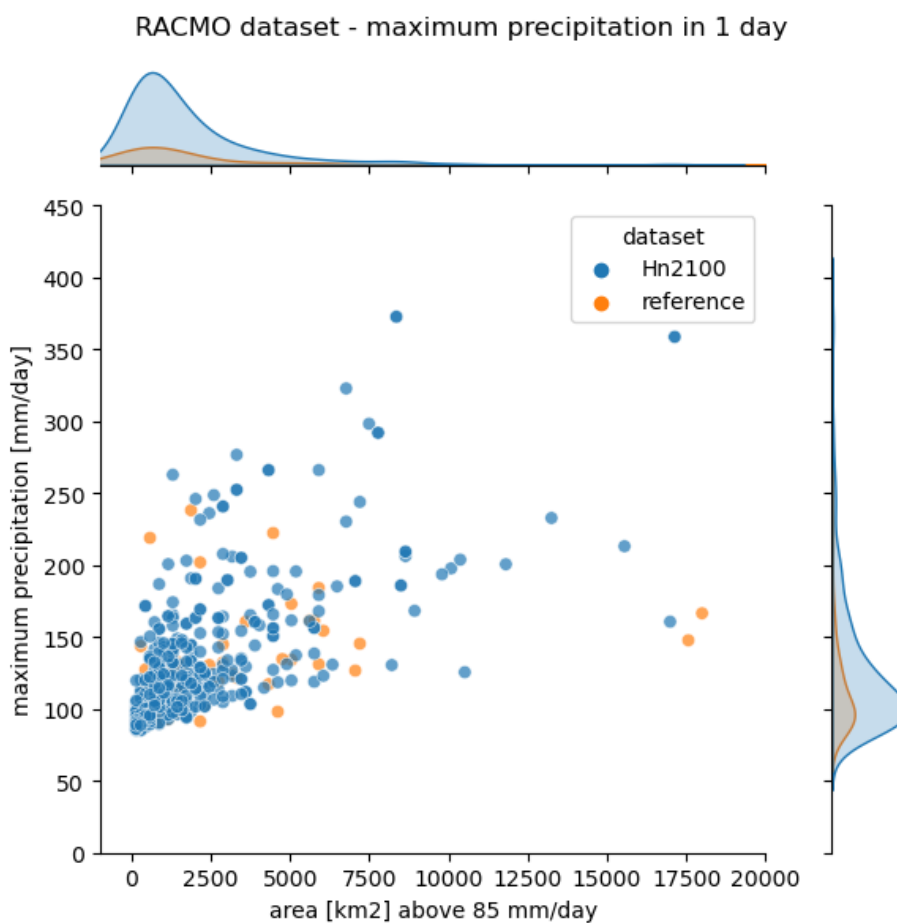
De bui in juli '21 kenmerkte zich vooral in grootschaligheid en hoeveelheid neerslag. In Figuur 30 kijken we daarom ook naar een tijdschaal van één dag voor dezelfde 48x48 km². We zien dat voor een gebied van 48x48 km² gemiddeld in één dag al ~130 mm per dag valt in de simulaties voor 2100H. Dat komt in de buurt van de hoeveelheid die tijdens juli 2021 in twee dagen viel. Overigens moet worden opgemerkt dat deze eendaagse gebeurtenis van 130 mm dezelfde gebeurtenis is als de tweedaagse gebeurtenis van 193 mm.

FIGUUR 34 EXTREME DAGELIJKSE GEMIDDELTE NEERSLAG VOOR EEN GEBIED VAN 48x48 KM² HUIDIG KLIMAAT (LINKS) EN HN-KLIMAATSCENARIO 2100 (RECHTS)



Om goed antwoord te geven op de vraag of naast de intensiteit ook de ruimtelijke schaal wordt beïnvloed door klimaatverandering, analyseren we deze in Figuur 35 in samenhang. Het figuur zet de maximale dagneerslag uit tegen de oppervlakte van de bui, voor huidig klimaat en 2100 Hn. Voor het bepalen van de oppervlakte zijn de pixels gebruikt waarbij de neerslagintensiteit minimaal 85 mm/d was. Dit laat zien dat voor aanzienlijk grotere gebieden dan $48 \times 48 = 2300 \text{ km}^2$ buien met extreme maxima in de RACMO simulaties voorkomen. We zien dat in de simulaties voor het 2100Hn scenario gebeurtenissen voor komen die niet alleen extremer zijn in intensiteit, maar ook grootschaliger.

FIGUUR 35 OPPERVLAKTE VAN BUI MET NEERSLAGINTENSITEIT VAN PIXELS VAN MINIMAAL 85 MM/D UITGEZET TEGEN DE MAXIMALE NEERSLAG 24-UURSOM



De toename van buigroottes is het gevolg van clustering. Kai Lochbihler, Pier Siebesma en Geert Lenderink schrijven hierover in een KNMI-klimaatbericht (Kai Lochbihler, 2021):

Onder warmere condities treden buien vaker op in georganiseerde clusters. Zogenaamde 'koude poelen' spelen hierbij een essentiële rol. Verdamping van vallende neerslag onttrekt warmte aan de lucht, waardoor deze afkoelt, zwaarder wordt en met de regen naar beneden beweegt. Deze koude poelen vallen als het ware omlaag en spreiden zich aan het aardoppervlak uit (figuur 3). De koude lucht die uitspreidt, tilt de daar aanwezige lucht op, wat weer nieuwe buiencellen kan initiëren. Zo ontstaan clusters van buien.

Daaraan wordt toegevoegd:

Omdat de groei van de grootte van buien ook afhankelijk is van andere factoren die nog niet onderzocht zijn, staat niet met zekerheid vast dat buien daadwerkelijk groter worden in een warmer Nederland.

Enige voorzichtigheid is geboden, omdat er aanwijzingen zijn dat RACMO sterkere clustering vertoont dan op basis van huidige inzichten realistisch wordt geacht en RACMO het hierboven beschreven proces van clustering niet (goed) kan representeren, vanwege de beperkte resolutie van 12x12km. We komen hierop terug in de discussie om daarna over te gaan naar de conclusies en aanbevelingen.

5.3 DISCUSSIE

De hierboven beschreven resultaten zijn verkennend van aard en geeft aanleiding tot nader onderzoek. Voor het trekken van conclusies met betrekking tot klimaateffecten op basis van deze gegevens alleen is voorzichtigheid geboden omdat het nog onvoldoende duidelijk is in hoeverre het RACMO model dergelijke grootschalige extremen betrouwbaar simuleert.

5.4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De grootschalige neerslaggebeurtenis in juli'21 heeft geleid tot een advies van de Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater tot het uitvoeren van bovenregionale stresstesten. We concluderen dat de RACMO simulaties voor 2100Hn grootschaligere en intensere gebeurtenissen bevatten dan voor het huidige klimaat. Dit geeft aanleiding dit type gebeurtenissen nader te analyseren.

We bevelen aan daarbij zowel historische gegevens als klimaatprojecties te bekijken. De gebiedsreductiefactoren gepresenteerd in STOWA (2019) zijn afgeleid uit radargegevens t/m 2008. In gegevens die sinds 2009 beschikbaar zijn gekomen, kunnen we analyseren of er verandering optreedt in de grootte van neerslaggebeurtenissen. Daarnaast zal moeten worden onderzocht in welke mate de RACMO simulaties deze grootschalige gebeurtenissen realistisch simuleert. Bij het KNMI zal dit vanaf september 2024 worden onderzocht binnen een masterthesisonderzoek van een student.

Onze aanbeveling is tweeledig. Het is ons advies de historische ontwikkelingen van schaal-grootte van neerslaggebeurtenissen te onderzoeken op eventuele veranderingen. Daarnaast adviseren wij de bestaande kennis op het gebied van klimaatontwikkeling van deze grootschalige gebeurtenissen in beeld te brengen en zo mogelijk te vertalen naar de effecten die we verwachten van een opwarmend klimaat.

6

REFERENTIES

Benard, A. en Bos-Levenbach (1953)

A. Benard en E.C. Bos-Levenbach. Het uitzetten van waarnemingen op waarschijnlijkheidspapier. *Statistica Neerlandica*, 7: 163-173 (1953).

KNMI 2023

R. van Dorland, J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink, M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Haarsma, I. Keizer, F. Krikken D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, B. Overbeek, H. de Vries, B. Wichers Schreur, K. van der Wiel (2023) KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. KNMI rapport: WR-23-02.

STOWA 2019

Beersma J, Hakvoort H, Jilderda R, Overeem A, Versteeg R (2019) Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019. STOWA Rapport 2019-19.

STOWA 2023

Nicolai R, van der Vliet N, Lugt D (2023) Beoordeling neerslagstatistiek, Meteo-onderzoek ten behoeve van het waterbeheer: Deelrapport 1. STOWA Rapport 2023-35.

Tradowsky J, Philip S Y, Kreienkamp F, et al (2023)

Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Climatic Change* Volume 176 (90).

Van den Brink H (2023)

Bepaling van de optimale referentie en de optimale subsets voor de KNMI'23 klimaatscenario's. KNMI rapport: TR-414.

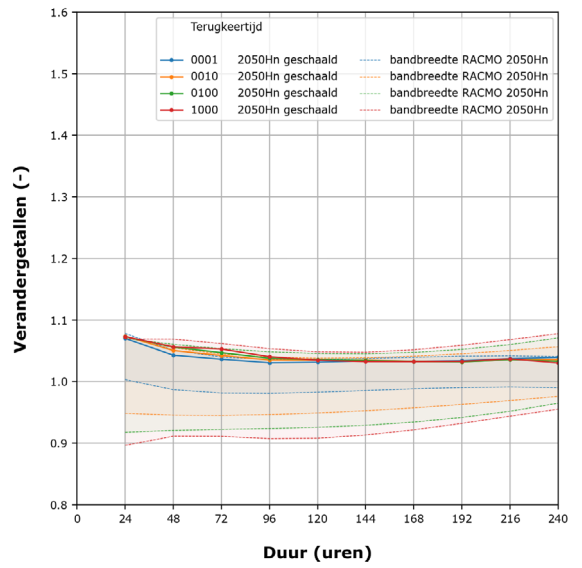
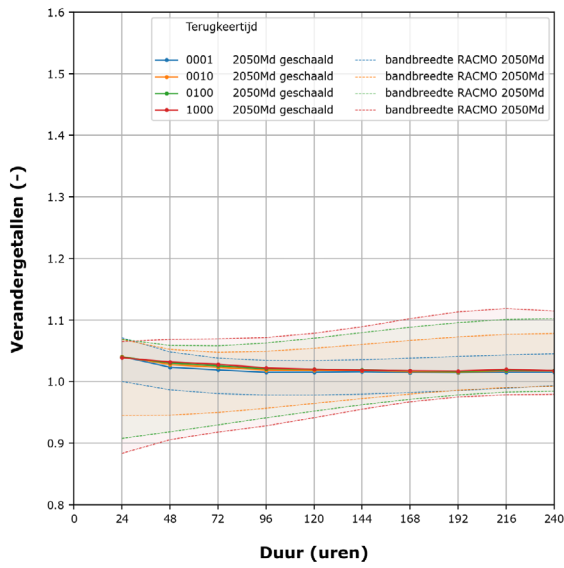
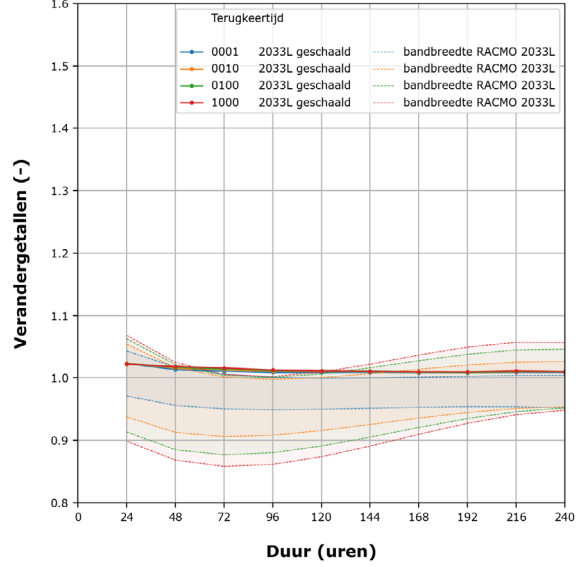
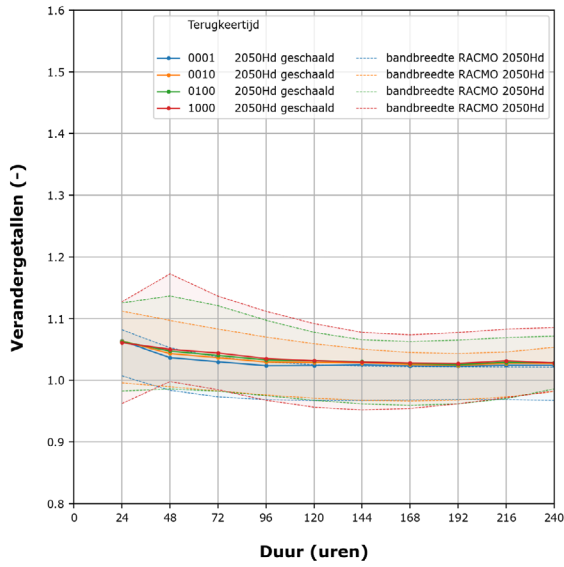
Van den Brink H, Groeneweg J, van Nieuwkoop J (2022)

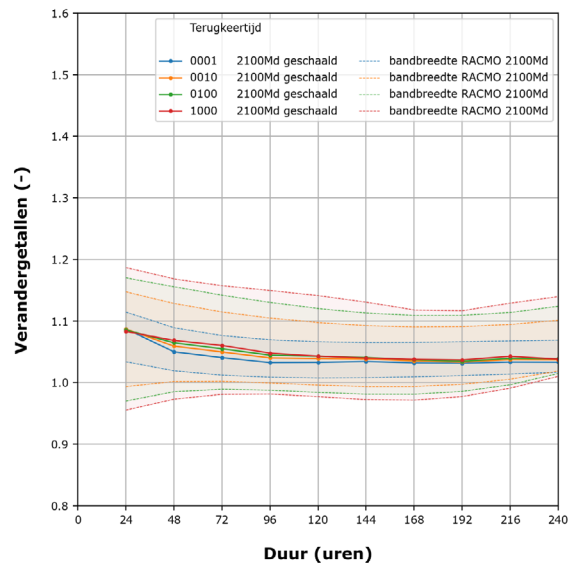
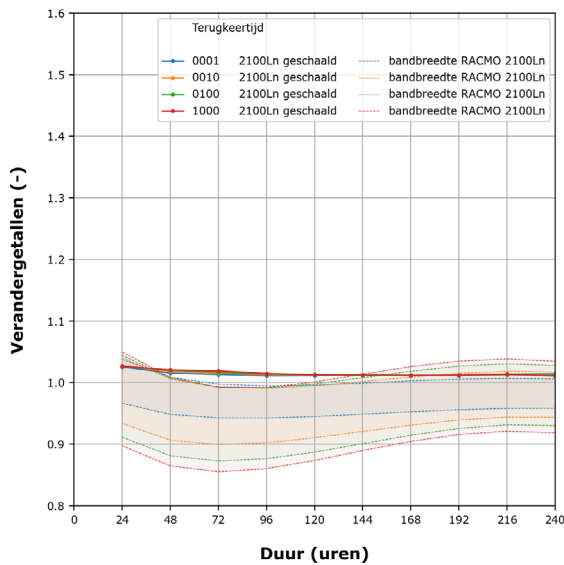
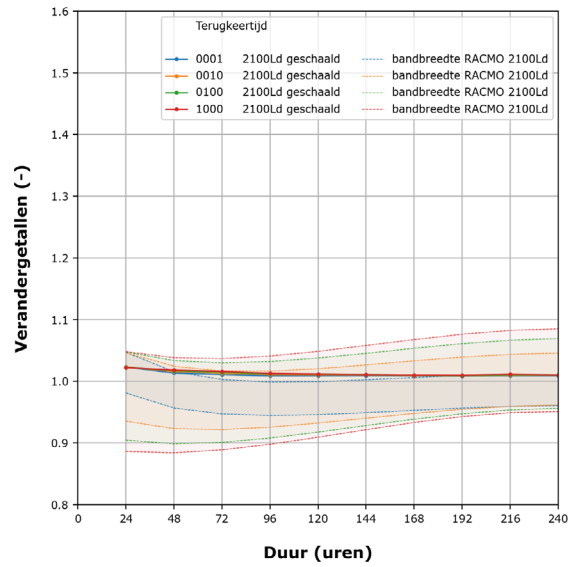
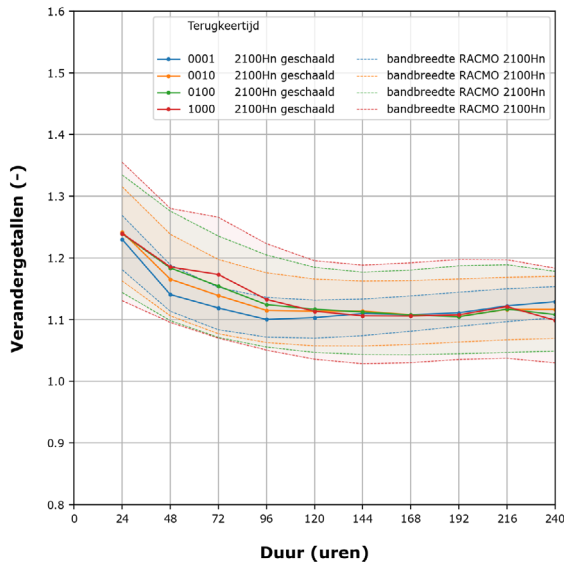
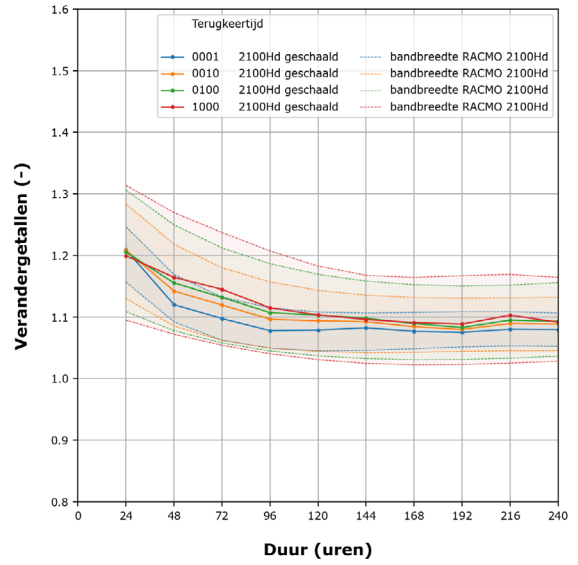
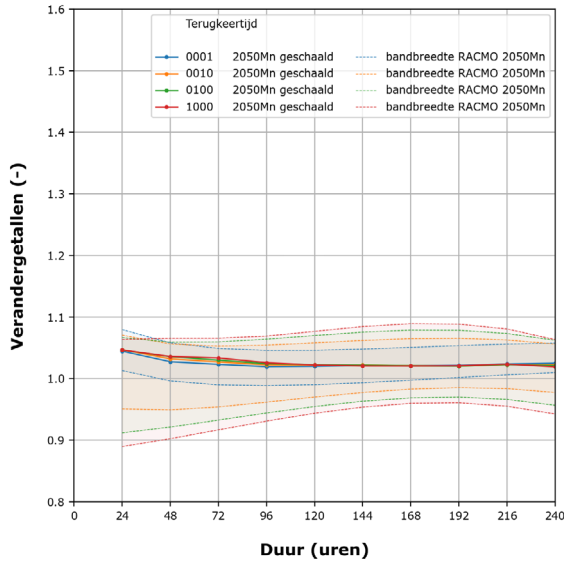
Trends and uncertainties in future storm climate : for extreme wind statistics to be used in safety assessment and design of water defences - Phase 1. In opdracht van: Rijkswaterstaat WVL. Document ID: 11206817-027-GEO-0001.

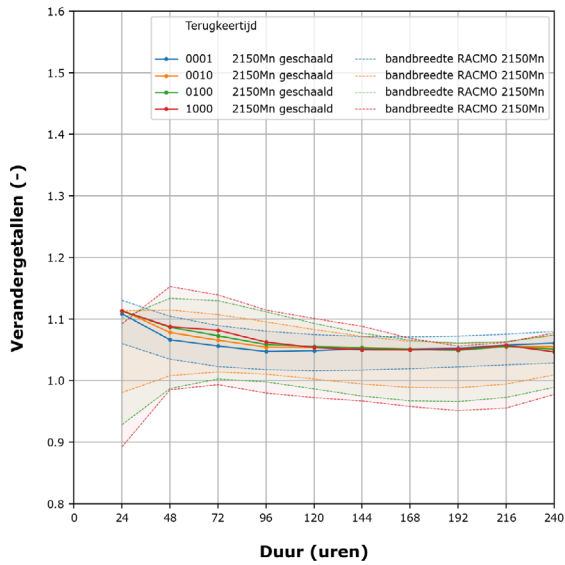
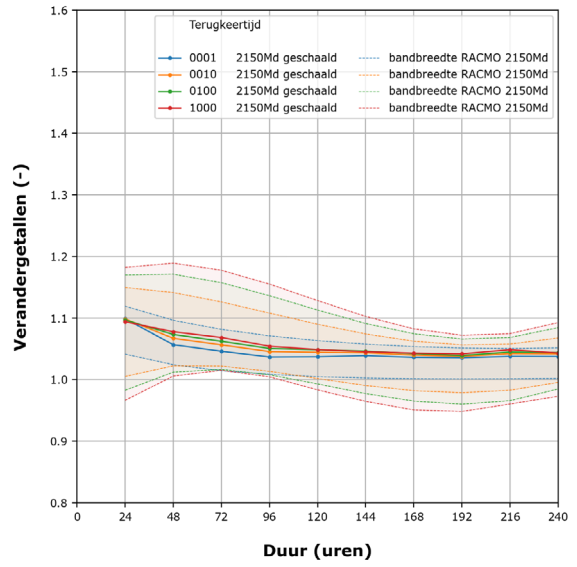
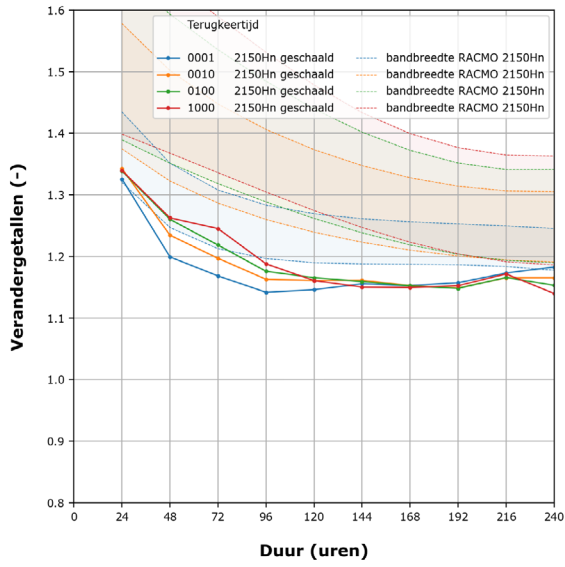
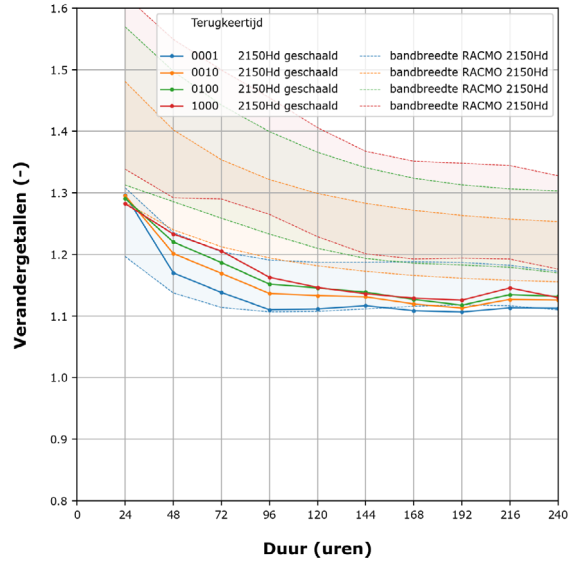
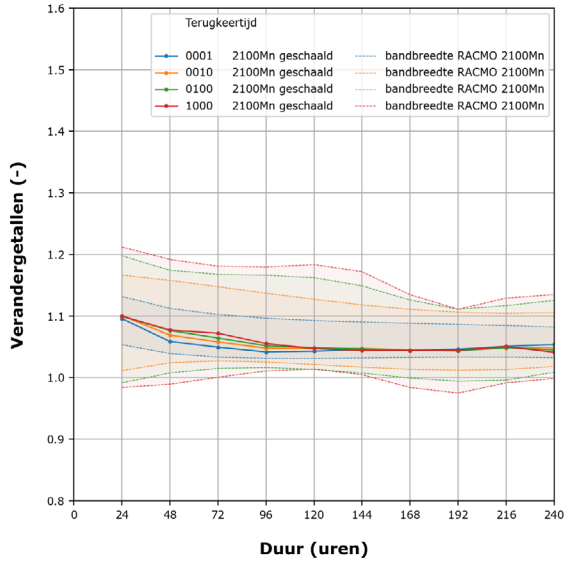
BIJLAGE A

FIGUREN NEERSLAGSTATISTIEK KNMI'23

A1 GESCHAALDE VERANDERGETALLEN VOOR JAARSTATISTIEK







A.2 GESCHAALDE VERANDERGETALLEN VOOR WINTERSTATISTIEK

