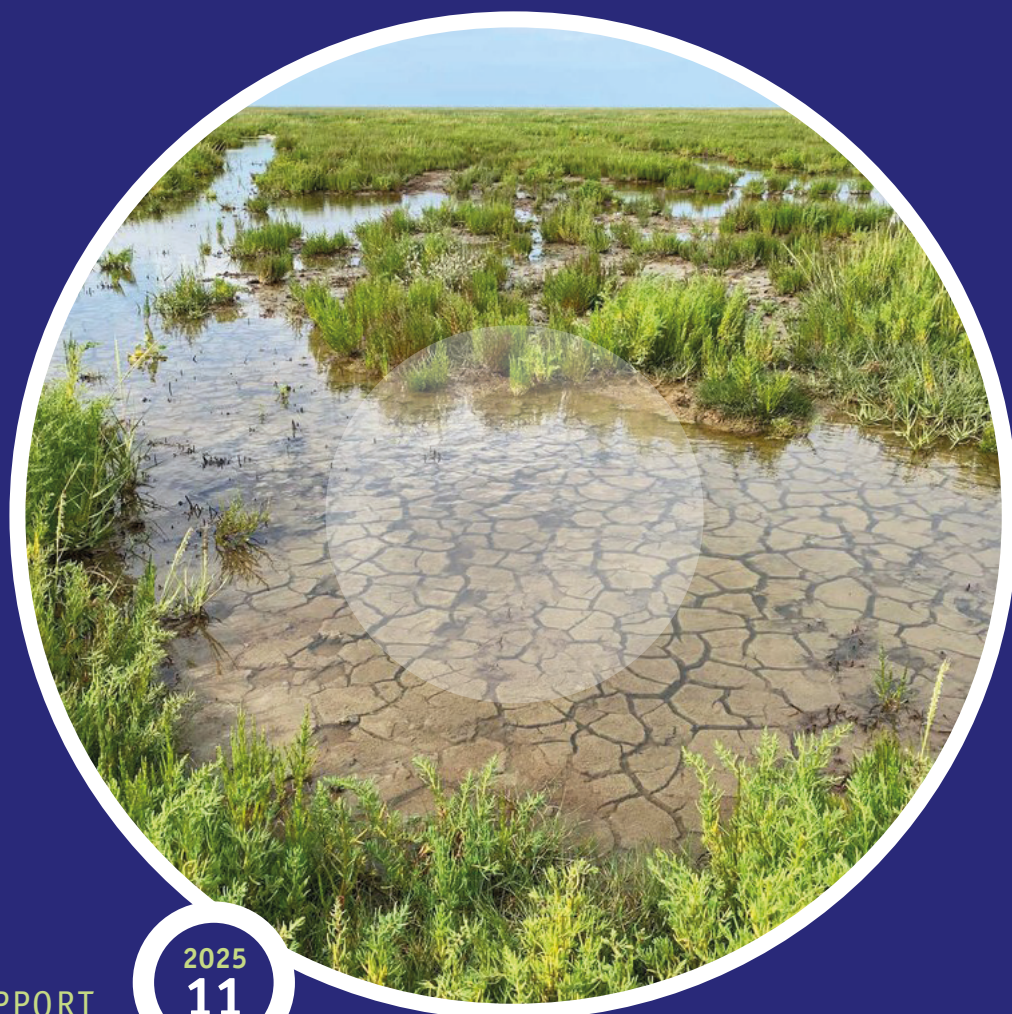


stowa

AFWEGINGSKADER ZOET-ZOUT DYNAMIEK

KENNISRAPPORTAGE BESCHIKBARE KENNIS INCLUSIEF
BESCHRIJVING HUIDIG FUNCTIONEREN



RAPPORT

2025
11

AFWEGINGSKADER ZOET-ZOUT DYNAMIEK
KENNISRAPPORTAGE BESCHIKBARE KENNIS INCLUSIEF
BESCHRIJVING HUIDIG FUNCTIONEREN

RAPPORT

2025

11

ISBN 978.94.6479.093.1



1 COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS dr. S.A.H. Weisscher (Witteveen+Bos)
drs. R. van Ek (Witteveen+Bos)
M. van der Kamp MSc. (Witteveen+Bos)
T.M.J. te Winkel MSc. (Acacia Water)
dr. T.C. van Hateren (Acacia Water)
ir. A.C. de Vos (The Salt Doctors)
dr. G. van Dijk (B-WARE)
Dr. G.J. van Geest (Van Geest Ecologie)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Eise Harkema (Staasbosbeheer)
Mark Kramer (Hoogheemraadschap van Rijnland)
Fred Kuipers (Waterschap Hollandse Delta)
Julia van der Leer (Hoogheemraadschap van Rijnland)
Ilya Musters (Waterschap Hollandse Delta)
Edwin van der Pouw Kraan (Waterschap Noorderzijlvest)
Wouter Quist (Rijkswaterstaat)
Rob Ruijtenberg (STOWA)
Esmée Vingerhoed (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Lidwien Willemse (Waterschap Scheldestromen)

REFERAAT Het klimaat verandert en beïnvloedt de zoet-zout dynamiek in Nederland. Door intensere droogteperiodes neemt de invloed van zout(er) water in laaggelegen gebieden toe, met gevolgen voor landbouw, natuur en waterkwaliteitsdoelen (KRW, N2000, NNN). Dit stelt waterbeheerders in hun beheer voor de vraag hoe het beste om te kunnen gaan met de zoet/zout dynamiek gedurende het jaar. In deze kennisrapportage wordt de thans beschikbare kennis over de zoet-zout dynamiek uiteengezet rondom de effecten op landbouw en natuur, als ook waar nog kennishiaten liggen. Deze kennisrapportage dient ter onderbouwing om praktische beheerhandvatten en aanbevelingen voor waterbeheerders te kunnen maken in een later afwegingskader.

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2025-11
ISBN 978.94.6479.093.1

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

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

TEN GELEIDE

Waterbeheerders hebben behoefte aan een afwegingskader om te gaan met zoet-zout dynamiek. Om dit kader te kunnen opstellen, is de beschikbare kennis over de zouttolerantie van landbouw, aquatische en terrestrische natuur in dit kennisdocument bijeengebracht.

In Nederland neemt de problematiek rondom droogte gestaag toe, met frequentere en intensere periodes van droge en hete zomers. Deze klimatologische verschuiving resulteert in een groeiend tekort aan zoetwaterbronnen. Het gevolg is een toenemende invloed van zout(er) water in diverse watersystemen in laag-Nederland, wat mogelijk verstrekkende gevolgen heeft voor landbouwgewassen, de natuur en de KRW-doelen.

Recente klimaatscenario's van het KNMI laten zelfs zien dat verzilting steeds prangender wordt door factoren als zeespiegelstijging, bodemdaling en frequente langdurige periodes van droogte met lage rivierwaterafvoeren. Tegelijkertijd zijn er gebieden met brakke natuur die tijdens extreme droogte gevoed worden met gebiedsvreemd water dat soms zoet is, wat verzoeting in de hand werkt.

Bij waterbeheerders is behoefte aan een afwegingskader waarbij de volgende twee overkoepelende kennisvragen centraal staan:

- Wat is het effect van verzilting of verzoeting op de natuur en landbouw?
- Wat is de hersteltijd na deze (tijdelijke) verzilting of verzoeting?

Om tot dat afwegingskader te komen is bestaande kennis in dit rapport op een rij gezet en deze geeft de inhoudelijke onderbouwing voor het afwegingskader. Naast dit rapport is er tegelijkertijd ook een rapport over de beheerderspraktijk verschenen, STOWA 2025-12.

De kennis van voorliggend rapport is omgezet in een praktische tool -het afwegingskader- die door de beheerders ingezet kan worden. Deze is te vinden op de STOWA -site.

Geconstateerd is dat er nog veel kennishiaten zijn op het gebied van verzilting. Om deze kennishiaten in te vullen zijn de ministeries van LNV en I&W, RWS en STOWA voornemens om een gezamenlijk kennisprogramma te ontwikkelen.

Dit onderzoek maakt deel uit van het STOWA kennisprogramma DROOGTE!

Mark van der Werf
Directeur STOWA

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.

AFWEGINGSKADER ZOET-ZOUT DYNAMIEK

KENNISRAPPORTAGE BESCHIKBARE KENNIS INCLUSIEF BESCHRIJVING HUIDIG FUNCTIONEREN

INHOUD

1	COLOFON	
	TEN GELEIDE	
	STOWA IN HET KORT	
2	INLEIDING	1
2.1	Aanleiding	1
2.2	Doel	1
	2.2.1 Doelgroep	1
2.3	Afbakening vraagstuk	2
	2.3.1 Afbakening van de kennisvraag	2
	2.3.2 Afbakening definities zout en zoet-zout dynamiek	2
	2.3.3 Afbakening in tijd	4
	2.3.4 Afbakening in ruimte	4
	2.3.5 Afbakening in functies	5
2.4	Werkwijze	13
2.5	Leeswijzer	14
3	ZOET-ZOUT DYNAMIEK EN INVLOEDEN	15
3.1	Inleiding	15
3.2	Zout	15
	3.2.1 Zoutklassen voor de aquatische en terrestrische natuur	16
	3.2.2 Zoutklassen voor de landbouw	17
3.3	Hydrologie	20
	3.3.1 Bronnen van zout	20
	3.3.2 Historische ontwikkeling	21
	3.3.3 Interne verzilting	26
	3.3.4 Externe verzilting	31
	3.3.5 Toekomstscenario's	33
	3.3.6 Verzoeting	37
3.4	Biogeochemie	37
	3.4.1 Invloed op chemische samenstelling en nutriënten	37
	3.4.2 Invloed van ontstaansgeschiedenis	44
3.5	Biologie	46
	3.5.1 Fysiologische mechanismen door het zoutgehalte	46
	3.5.2 Fysiologische mechanismen door sulfide en ammonium toxiciteit	48
	3.5.3 Classificatie van gewassen	50

4	AQUATISCHE ECOLOGIE	52
4.1	Inleiding	52
4.2	Effecten van zout op soorten en ecologisch functioneren	52
4.2.1	Soortenrijkdom	52
4.2.2	Effecten op soortensamenstelling	53
4.2.3	Effecten op ecologisch functioneren van het voedselweb	56
4.2.4	Vissen	57
4.3	Stelregels op basis van de eigenschappen van een zoutpuls	60
4.4	Grenswaarden voor verzilting	61
4.4.1	Zoete wateren	62
4.4.2	Voormalig brakke en verzoete wateren	63
4.4.3	Brakke wateren	63
4.5	Grenswaardes voor verzoeting	63
4.6	Hersteltijd	64
4.7	Kennishiaten en benodigd onderzoek	65
4.8	Samenvatting met zaken die relevant zijn voor het afwegingskader	66
5	TERRESTRISCHE NATUUR	71
5.1	Inleiding	71
5.2	Effecten zoet / zout dynamiek	71
5.2.1	Soortenrijkdom	71
5.2.2	Verschillen in ecologisch functioneren van verschillende situaties	73
5.2.3	Grenswaarden voor verzilting en verzoeting	76
5.3	Hersteltijd	79
5.4	Kennishiaten en benodigd onderzoek	79
5.5	Samenvatting met zaken die relevant zijn voor het afwegingskader	81
6	LANDBOUW	85
6.1	Inleiding	85
6.2	Effecten van irrigatie op de bodem en doelgewassen	85
6.3	Effecten van korte blootstelling aan zout op planten	89
6.4	Effecten van zout op planten in verschillende ontwikkelingsstadia	91
6.4.1	Drempelwaardes voor de zouttolerantie van de doelgewassen	93
6.5	Kennishiaten en benodigd onderzoek	96
6.6	Samenvatting met zaken die relevant zijn voor het afwegingskader	97
7	CONCLUSIE	100
8	REFERENTIES	102
BIJLAGE I	VELDGEGEVENS VAN HET VOORKOMEN VAN SOORTEN VEGETATIE IN RELATIE TOT ZOUTGEHALTE	113
BIJLAGE II	VELDGEGEVENS VAN HET VOORKOMEN VAN SOORTEN VEGETATIE IN RELATIE TOT HET AMMONIAKGEHALTE	118
BIJLAGE III	BESCHIKBARE KENNIS EN KENNISLEEMTEN HYDROLOGISCH EN BIOGEOCHEMISCH FUNCTIONEREN IN AQUATISCHE EN TERRESTRISCHE NATUUR	123
BIJLAGE IV	VAATPLANTEN IN TERRESTRISCHE NATUUR INGEDEELD NAAR ZOUTPREFERENTIE	128
BIJLAGE V	NATUURDOELTYPEN INGEDEELD NAAR ZOUTPREFERENTIE	132
BIJLAGE VI	BESCHIKBARE KENNIS EN KENNISLEEMTEN OVER DE EFFECTEN VAN VERZILTING OP BODEM EN GEWAS	136

2

INLEIDING

2.1 AANLEIDING

In Nederland neemt de problematiek rondom droogte gestaag toe, met frequentere en intensere periodes van droge en hete zomers. Deze klimatologische verschuiving resulteert in een groeiend tekort aan zoetwaterbronnen. Het gevolg is een toenemende invloed van zout(er) water in diverse watersystemen in laag-Nederland, wat mogelijk verstrekkende gevolgen heeft voor landbouwgewassen, de natuur en de KRW- doelen. Het fenomeen van verzilting, waarbij het zoutgehalte in bodem, grondwater en oppervlaktewater toeneemt, vormt een uitdaging die al geruime tijd in Nederland speelt. Recente klimaatscenario's van het KNMI laten zelfs zien dat deze uitdaging steeds prangender wordt door factoren als zeespiegelstijging, bodemdaling en frequente langdurige periodes van droogte met lage rivierwaterafvoeren. Deze factoren vergroten de problematiek rondom verzilting. Tegelijkertijd zijn er gebieden met brakke natuur die tijdens extreme droogte gevoed worden met gebiedsvreemd water dat soms zoet is, wat verzoeting in de hand werkt.

In reactie op de recente droogte-initiatieven heeft STOWA het kennisprogramma DROOGTE! gelanceerd. Een belangrijke kennisvraag binnen dit programma richt zich op hoe waterbeheerders het best om kunnen gaan met de zoet-zout dynamiek gedurende het jaar, en welke effecten dit heeft op landbouw, natuur en KRW- doelen. Ondanks bestaande publicaties, samenwerkingen en onderzoeksprogramma's, blijft er veel onduidelijkheid rondom het zoutvraagstuk. Praktische beheerhandvatten voor waterbeheerders zijn daarom cruciaal, gezien de dagelijkse noodzaak voor het maken van praktische keuzes.

2.2 DOEL

Het doel van deze kennisrapportage is het opstellen van een overzicht van de laatste kennis en kennishiaten over (1) welke effecten optreden als zout water in zoet water terecht komt (en vice versa) en (2) wat de hersteltijd is na een tijdelijke verandering van zoutgehalte. Voor deze twee kennisvragen wordt in deze rapportage onderscheid gemaakt tussen de aquatische natuur, de terrestrische natuur en de landbouw in de Nederlandse context. Deze kennisrapportage is een onderdeel van het project 'Afwegingskader zoet-zout dynamiek in relatie tot inlaat en droogte.' Binnen het grotere project wordt een praktisch afwegingskader opgesteld dat waterbeheerders middels een beslisboom sturing geeft hoe om te gaan met zoet-zout dynamiek. Deze kennisrapportage levert de inhoudelijke onderbouwing voor de beslisboom.

2.2.1 DOELGROEP

De doelgroep van het project 'Afwegingskader zoet-zout dynamiek in relatie tot inlaat en droogte' zijn beleidsmakers en operationele waterbeheerders die verantwoordelijk zijn voor het maken van afwegingen in het operationeel waterbeheer ter attentie van verziltingsvraagstukken. De beslisboom, een van de eindproducten van het project, is een hulpmiddel voor deze doelgroep en dient bruikbaar te zijn voor adviserende experts, beleidsmakers en operationele waterbeheerders.

2.3 AFBAKENING VRAAGSTUK

Om de huidige kennis en kennishiaten op het gebied van de zoet-zout dynamiek in beeld te brengen, is het belangrijk het vraagstuk duidelijk af te bakenen. Hieronder volgt een afbakening van het vraagstuk op de volgende aspecten: kennisvragen, zout (definitie), ruimte, tijd en functie van water- en landgebruik. Deze afbakening is in gezamenlijkheid met de begeleidingscommissie en de STOWA opgesteld en dient als een leidraad voor het verdere verloop van het project.

2.3.1 AFBAKENING VAN DE KENNISVRAAG

De vraagstelling vanuit de STOWA gaat over het onderwerp zoet-zout dynamiek en hoe te handelen vanuit de functies natuur (aquatisch en terrestrisch) en landbouw. Het gaat hierbij concreet over de volgende twee overkoepelende kennisvragen:

1. wat is het effect van verzilting of verzoeting op de natuur en landbouw?
2. wat is de hersteltijd na deze (tijdelijke) verzilting of verzoeting?

Om deze twee overkoepelende kennisvragen te kunnen beantwoorden en aan te kunnen geven waar nog kennishiaten liggen, is het noodzakelijk om eerst de laatste kennis en kennishiaten onderliggend aan deze vragen in beeld te brengen (uitgewerkt in hoofdstuk 3). Denk hierbij aan hydrologische kennis (waar komt het zoetwater en zoutwater vandaan en waar komt het terecht?), de biogeochemie (welke biogeochemische interacties spelen er in het grondwater, oppervlaktewater en de (water)bodem) en de biologie (hoe werken de hydrologische en biogeochemische processen met betrekking tot de zoet-zout dynamiek door op soorten en gewassen?). Deze onderliggende kennis dient namelijk als kennisbasis en als stap in een navolgbaar denkproces richting het beantwoorden van de twee kennisvragen.

2.3.2 AFBAKENING DEFINITIES ZOUT EN ZOET-ZOUT DYNAMIEK

In dit project wordt in verschillende contexten (namelijk: natuur, landbouw) gesproken over 'zout' en 'zoet- zout dynamiek'. Het is daarom belangrijk om aan het begin helder te krijgen wat met deze twee begrippen wordt bedoeld. Deze begrippen worden hieronder kort toegelicht.

ZOUT - HOE TE CLASSIFICEREN?

In de meest basale definitie is zout water een oplossing van zouten in water. Er is echter geen universele classificatie van de zoutconcentratie in water en in de bodem. Daarnaast zijn er verschillende manieren om zoutconcentratie uit te drukken die verschillen voor water en bodems.

Zoutconcentratie in water

In de landbouw wordt de zoutconcentratie van (irrigatie/beregenings-)water meestal met 'EC' uitgedrukt. De EC staat voor elektrische conductiviteit, met als eenheid deciSiemens per meter (dS/m) ofwel milliSiemens per cm (mS/cm). De EC-waarde is de som van de concentraties van positief geladen ionen in het water. De vier meest voorkomende positief geladen ionen zijn: natrium (Na⁺), kalium (K⁺), calcium (Ca²⁺) en magnesium (Mg²⁺). Deze positief geladen ionen zijn in balans met de negatief geladen ionen, waarvan chloride (Cl⁻), bicarbonaat (HCO₃⁻) en sulfaat (SO₄²⁻) de meest dominante zijn. Water met een EC-waarde lager dan 0,7 dS/m wordt over het algemeen beschouwd als zoet. Afhankelijk van de gevoeligheid van de gewassen, kan water met een EC-waarde hoger dan 2-4 dS/m problemen opleveren.

Het is mogelijk om in plaats van de positief geladen ionen, de negatief geladen ionen te gebruiken om de EC-waarde te bepalen. Een van deze negatief geladen ionen, namelijk chloride, wordt ook als methode gebruikt om het zoutgehalte van water uit te drukken, met als eenheid mg chloride per liter (mg Cl/l). Deze meetmethode wordt bijvoorbeeld veelal toegepast in de aquatische en terrestrische ecologie. In brakke en zoute gebieden correspondeert een verhoogde EC-waarde met het voorkomen van zout water.

In zoete wateren is een verhoogde EC vaak gecorreleerd aan mineraalrijk grondwater of vervuiling vanuit bijvoorbeeld de landbouw.

Het is niet gemakkelijk een correlatie te trekken tussen EC-waardes en chloridegehalten. Dit komt hoofdzakelijk doordat chloride maar één van de negatief geladen ionen is en dus maar deels verantwoordelijk is voor de gemeten EC-waarde. Met name voor lage EC-waarden (onder de 2 dS/m) is de correlatie onduidelijk, omdat andere negatief geladen ionen dan kunnen domineren. Bij hogere EC-waarden zijn Na⁺ en Cl⁻ meestal dominant en dat zijn de ionen (vooral Na⁺) die de meeste negatieve effecten opleveren.

Zoutconcentratie in bodems

Voor de zoutconcentratie in bodems is de classificatie anders dan voor water. Zo worden bijvoorbeeld kalium en sulfaat gebruikt als meststoffen in de landbouw, terwijl dit ook zouten zijn die bijdragen aan een mogelijk verhoogde EC. Ook voor bodem bestaan diverse classificaties, maar een gangbare versie gaat ervan uit dat een bodem met een EC van 2 dS/m of lager nog als zoet beschouwd kan worden (terwijl dit voor water dus 0,7 dS/m is). Deze EC van de bodem wordt bepaald in een waterextract van een bodemmonster dat eerst volledig is verzadigd met water, waarna de waterfractie wordt onttrokken aan de bodem (bijvoorbeeld: via een vacuümpomp). Dit is de internationale standaard om bodemzout te meten. De EC-waarde van dit extract van de bodem wordt aangeduid als EC_e (EC extract). Deze waarde wordt gecombineerd met de zuurgraad (pH) en de bodemstructuur om te bepalen hoe zout een bodem is. Een meer gedetailleerde uitleg hiervan staat beschreven in paragraaf 3.4.1.

Gevolgen voor classificatie

Naast het verschil in hoe zoutconcentratie kan worden uitgedrukt voor water (EC-waarde, alleen chloridegehalte) en bodems (EC_e-waarde + pH + bodemstructuur), bestaat er ook nog een verschil in welke klassengrenzen voor zout worden gehanteerd. De keuze voor de klassengrenzen (zoet, licht-matig-sterk-zeer sterk zout en andere variaties) hangt sterk af met welke bril naar het onderwerp zout wordt gekeken. Zo wordt in de landbouw gekeken vanuit de gevoeligheid voor zout van geteelde gewassen. Voor de aquatische en terrestrische ecologie wordt gekeken naar wat zout betekent voor de stress die aquatische en terrestrische soorten ervaren. In paragraaf 3.4.1 wordt nader beschreven welke meetmethode voor zout en welke klassengrenzen worden gehanteerd.

Het is van belang om per thema de beschikbare kennis boven te halen en te spreken over concrete getallen en concentraties (EC, chloride) in plaats van kwalitatieve woorden zoals zoet/brak/zout.

ZOET-ZOUT DYNAMIEK

Met de term 'zoet-zout dynamiek' doelen we op het samenspel van hydrologische en biogeochemische processen die spelen als (grond)water in contact komt met (grond)water met een hoger/lager zoutgehalte. Enkele voorbeelden zijn: zoute kwel naar een overwegend zoet oppervlaktewater of akkerbouwgebied en het actief beheerd inlaten van water met een hoger of lager zoutgehalte. Het actief beheerd inlaten van water met een ander zoutgehalte

gebeurt steeds vaker om bijvoorbeeld het waterpeil te beheren, effecten van droogte tegen te gaan en te voldoen aan de watervraag. Dit koppelt terug naar de aanleiding van dit project, omdat nu vaak onduidelijk is wat de gevolgen van zulk beheer zijn voor de hydrologische, biogeochemische en biologische processen. Het woord ‘dynamiek’ refereert dus naar de verandering in de tijd. Wat is de tijdsduur, intensiteit, relatieve verandering ten opzichte van de normaalsituatie?

2.3.3 AFBAKENING IN TIJD

De uiteindelijke beslisboom waar deze kennisrapportage onderliggend aan is, is een hulpmiddel om te bepalen hoe om te gaan met zoet/zout dynamiek in relatie tot het waterbeheer. Hierbij is het belangrijk om vast te stellen voor welke tijdstermijn deze beslisboom wordt opgesteld. Als uitgangspunt geldt dat er behoefte is voor een breed draagvlak in hoe nu te handelen. Anticiperen op de toekomst is geen startpunt, maar kan wel een uitkomst van de beslisboom zijn. Desalniettemin speelt klimaatverandering ook nu al. De tijdstermijn is vooral bepalend voor de gebruiker en bepaalt met welk inzicht naar het waterbeheer wordt gekeken.

Binnen het project ‘Afwegingskader zoet-zout dynamiek in relatie tot inlaat en droogte’ ligt de focus dus op actuele vraagstukken die spelen in het huidige waterbeheer in Nederland. De nadruk ligt op het in beeld brengen van kennis over de effecten van zoet-zout dynamiek met een zichtstermijn tot 2030. Lange termijn scenario’s en eventuele effecten daarvan, zoals structurele veranderingen in het waterbeheer (bijvoorbeeld: verzilting van nu zoete gebieden), zijn niet beschouwd binnen dit project. Desalniettemin kan de verzamelde kennis in deze rapportage inzicht bieden in mogelijke effecten in de zoet-zout dynamiek bij structurele veranderingen.

2.3.4 AFBAKENING IN RUIMTE

Binnen het project ‘Afwegingskader zoet-zout dynamiek in relatie tot inlaat en droogte’ ligt de focus op hoe een toename van zoutgehalte doorwerkt op het gebruik van zoetwater, en in mindere mate hoe een afname van zoutgehalte doorwerkt op het gebruik van brak/zout water. Daartoe worden alleen binnendijkse gebieden in beschouwing genomen die thans onder invloed staan van zoet-zout dynamiek. Dit beslaat alsnog een groot deel van Nederland. Onder andere de provincies Zeeland, Noord-Brabant, Zuid-Holland, Noord-Holland, Flevoland, Friesland en Groningen hebben of krijgen in toenemende mate te maken met invloeden van zoet-zout dynamiek. Buitendijkse gebieden en grote wateren (bijvoorbeeld: Westerschelde, Oosterschelde, Grevelingenmeer, Haringvliet, Markermeer, IJsselmeer, Waddenzee, Lauwersmeer) worden in dit project niet in beschouwing genomen. Dit wil overigens niet zeggen dat de kennisrapportage, beheerpraktijk en beslisboom niet ook toepasbaar kunnen zijn op grotere wateren. Het is echter aan de gebruiker om te bepalen of de kennis onderstaand toereikend is voor de toepassing op de grote wateren. In de toelichting bij ‘afbakening functies’ wordt nader stilgestaan hoe we landbouwgebieden, terrestrische natuurgebieden en watersystemen classificeren die binnen de scope van deze rapportage vallen.

2.3.5 AFBAKENING IN FUNCTIES

De functies van het water en land in Nederland zijn talrijk en veel van deze gebieden staan onder invloed van zoet-zout dynamiek. In het kader van dit STOWA project worden alleen de volgende functies beschouwd:

- natuur:
 - aquatische ecologie en waterkwaliteit;
 - terrestrische ecologie;
- agrarisch landgebruik.

Een functie die veel naast of in samenspel met bovenstaande functies voorkomt, is infrastructuur. Denk hierbij aan bebouwing, dijken, wegen en kunstwerken. Ook de functie infrastructuur kan effecten ondervinden van droogte en zoet-zout dynamiek. Tijdens droogte kan er bijvoorbeeld sprake zijn van een verlaging van het (grond)waterpeil, wat kan leiden tot paalrot en instabiliteit. Zoet-zout dynamiek door zoute kwel of de inlaat van zouter of zoeter water kan leiden tot corrosie. Dergelijke effecten op de infrastructuur worden in dit project echter buiten beschouwing gelaten.

De drie geselecteerde functies (aquatische ecologie, terrestrische ecologie, landbouw) vereisen een verdere onderverdeling om de overkoepelende kennisvragen over de effecten van zoet-zout dynamiek en hersteltijd in beeld te brengen. Binnen elke functie zijn er namelijk nog steeds grote verschillen aan fysieke en biogeochemische omstandigheden als ook soorten en gewassen. De effecten van zoet-zout dynamiek en hersteltijd kunnen daarom sterk verschillen per gebied. Dit heeft ook gevolgen voor het waterbeheer; een onderverdeling van de functies draagt bij aan een efficiënter afwegingskader hoe om te gaan met de zoet- zout dynamiek. Hieronder volgt een beschrijving welke onderverdeling per functie als relevant wordt gezien voor het doel van dit project.

AQUATISCHE NATUUR (KRW)

De indeling van gebieden in Nederland naar zoet of brak is redelijk arbitrair. Veel voormalig zoute gebieden in laag-Nederland zijn in de loop der tijd verzoet door aanvoer van zoet water van elders. Brakke gebieden kunnen zouter worden, en zoete gebieden die normaliter nooit onder invloed van brak water staan, kunnen nu te maken krijgen met plotselinge zoutpulsen. Daarnaast wordt in enkele van die gebieden weer actief geprobeerd te sturen op verzilting in het kader van natuurontwikkeling. Kortom, het zoutgehalte in de Nederlandse wateren is in de afgelopen eeuwen soms flink veranderd en dit heeft een weerslag op hoe deze wateren reageren op een (nieuwe) verandering van zoutgehalte vandaag de dag. Het is daarom belangrijk om de ontstaansgeschiedenis mee te nemen om de effecten van de zoet-zout dynamiek te kunnen duiden.

Een belangrijke parameter waar de ontstaansgeschiedenis een invloed op heeft, is de bodemsamenstelling. Doorgaans hebben bodems die gevormd zijn onder brakke condities een andere samenstelling dan bodems die gevormd zijn onder zoete condities. Bodems die van origine brak zijn, bevatten vaak een hoger sulfaat- en zoutgehalte en minder ijzer-gebonden fosfor dan 'zoete' bodems (door een hoge sulfaatconcentratie). Dit kan ertoe leiden dat voormalig brakke systemen, ondanks dat ze onder de huidige condities 'zoet' zijn, biogeochemisch anders functioneren én reageren op veranderende zoutconcentraties dan van origine zoete systemen. Het is daarom belangrijk om onderscheid te maken tussen verschillende algemene vormen van ontstaansgeschiedenis om de effecten van de zoet-zout dynamiek nader te kunnen duiden. Om deze reden maken we voor het afwegingskader onderscheid tussen de volgende situaties:

1. permanent brakke gebieden, eventueel met zoete invloeden. Dit zijn gebieden die onder brakke condities zijn ontstaan, waarbij de bodem, het grondwater en het oppervlaktewater geheel of grotendeels brak zijn;
2. voorheen brakke/zoute gebieden die nu (deels) verzoet zijn. Dit zijn gebieden die onder brakke condities zijn ontstaan, maar waarvan nu het oppervlaktewater (en mogelijk deels het grondwater) is verzoet;
3. gebieden die oorspronkelijk zoet zijn, en die nu blootgesteld kunnen worden aan zout(pulsen). Dit zijn gebieden die onder zoete condities zijn ontstaan en weinig tot geen blootstelling aan zout hebben meegemaakt.

Binnen elk van deze gebieden kan vervolgens onderscheid gemaakt worden tussen het bodemtype (respectievelijk veen, klei of zand). In Kader 2.1 zijn de drie situaties voor de aquatische natuur (KRW) verder toegelicht met voorbeelden uit de Nederlandse context. Dit onderscheid in ontstaansgeschiedenis en bodemtype sluit ook goed aan de systematiek die door de Kaderrichtlijn Water (KRW) wordt gehanteerd. De aquatische natuur in Nederland is beschermd middels de KRW. De KRW onderscheidt verschillende watertypen, en binnen deze classificatie spelen het chloridegehalte en bodemtype een belangrijke rol. Op basis van bovengenoemde gebiedsindeling kunnen de KRW-typen als volgt worden ingedeeld die relevant zijn binnen deze opdracht:

TABEL 2.1 ONDERVERDELING VAN KRW-WATERTYPEN NAAR ONTSTAANSGESCHIEDENIS

Onderverdeling naar situatie	KRW-watertypen	Opmerkingen
permanent brakke gebieden	M30: zwak brakke wateren M31 kleine brakke tot zoute wateren M32 grote brakke tot zoute meren	- verder onderscheid is nog te maken naar bodemtype (zand, klei, veen) - M30: enkele wateren zoals Zuiderdiep kunnen ook nu deels verzoet zijn. Het Zuiderdiep krijgt namelijk in de winter te maken met zoutpulsen - M32: alleen voor binnenwateren. Veerse Meer valt bijvoorbeeld buiten de scope
voorheen brakke/zoute gebieden die nu deels zoet zijn*	M01b: niet zoete, gebufferde sloten op zand of klei	- verder onderscheid is nog te maken naar bodemtype (zand, klei, veen) - wanneer gebieden geheel verzoet zijn, kunnen aan deze gebieden ook KRW-typen worden toegekend van 'oorspronkelijk zoete wateren' (zie volgende regel in tabel)
gebieden die oorspronkelijk zoet zijn, en die nu blootgesteld kunnen worden aan zout(pulsen)*	M01a: gebufferde sloten op zand of klei (zwak brak) M03: gebufferde (regionale) kanalen M06: grote ondiepe kanalen M07: grote diepe kanalen M08: gebufferde laagveensloten M10: laagveenvaarten en – kanalen M11: kleine ondiepe gebufferde plassen M14: ondiepe gebufferde plassen M15: ondiepe grote gebufferde meren M20: matig grote diepe gebufferde meren M21: grote diepe gebufferde meren M22: kleine ondiepe kalkrijke plassen M23: grote ondiepe kalkrijke plassen M25: ondiepe laagveenplassen M27: matig grote ondiepe laagveenplassen M29: matig grote diepe laagveenmeren	- verder onderscheid is nog te maken naar bodemtype (zand, klei, veen)

* De indeling van de KRW-watertypen is niet rigide; zo kan het voorkomen dat een waterlichaam onder brakke condities is gevormd, maar dat de bodem over de tijd zover is verzoet, dat de bodem biogeochemisch hetzelfde functioneert als een bodem die onder zoete omstandigheden is gevormd. Ook zijn er uitzonderingen denkbaar van KRW-waterlichamen die nu onder 'oorspronkelijk zoet' staan die in werkelijkheid wel een brakke geschiedenis hebben gehad en thans nog een brakke bodem hebben. De KRW-watertypen in deze tabel zijn ingedeeld in de situaties waarin ze het vaakst voorkomen. In het afwegingskader, waar deze kennisrapportage de kennisbasis voor vormt, is de mogelijkheid om uitzonderingen van KRW-watertypen in de situatie te beschouwen die het best past bij de werkelijkheid.

Per KRW watertype zijn er doelen gesteld voor de biologie en de fysische-chemie. Binnen dit project ligt de focus op de biologische doelen (waterplanten, vis, macrofauna en algen). De biologie is immers een resultante van de hydrologie en de chemie.

Naast de KRW zijn er ook vanuit N2000 nog habitattypen die in deze kennisrapportage onder aquatische natuur worden meegenomen. Het betreft hier alleen de aquatische habitattypen die binnendijks voorkomen en thans onder invloed (kunnen) staan door zoet-zout dynamiek. Deze zijn gesommeerd in tabel 2.2.

TABEL 2.2

N2000 HABITATTYPEN DIE BINNEN DE SCOPE VAN AQUATISCHE NATUUR VALLEN

Habitatype	Naam
H3140	kranswierwateren
H3150	meren met krabbenscheer en fonteinkruiden

* De Habitatrichtlijnsoort kruipend moerasscherm is een kenmerkende oeversoort die in kreken / drassige graslanden voorkomt in zoete tot matig brakke condities.

Voor de biologische kwaliteitselementen zijn in de zogenaamde maatlatdocumenten de doelen vastgelegd. Voor wat betreft de hersteltijd maken we een onderscheid tussen de abiotische en biotische hersteltijd. De abiotische hersteltijd is de tijd die nodig is voor het zoutgehalte (en samenhangende biogeochemische processen) terug te keren naar een staat waarin de beoogde doelsoorten in theorie weer kunnen voorkomen. De biotische hersteltijd is de tijd die nodig is voor de ecologie om te herstellen (bijvoorbeeld: terugkeer van soorten van voor de zout- of zoetpuls). De biotische hersteltijd hangt onder andere af van de eigenschappen van individuele soorten als ook hoe wateren met elkaar verbonden zijn (is terugkeer mogelijk?) en geschikte standplaatsen (nog steeds) beschikbaar zijn. Hoewel biotisch herstel al mogelijk gedeeltelijk plaats kan vinden als de abiotiek aan het herstellen is, hanteren we als totale hersteltijd: de abiotische hersteltijd + de biotische hersteltijd.

TERRESTRISCHE NATUUR

Als het gaat om terrestrische natuur en de gevoeligheid voor zout, dan wordt veelal gekeken naar vaatplanten. Vaatplanten hebben een hoge milieu indicatieve waarde. Vaatplanten zijn met hun wortels in de bodem sterk gekoppeld aan hun standplaats met bijbehorende milieucondities. Door Alterra (nu WEnR) is een overzicht opgesteld van de zoutgevoeligheid van natuurdoeltypen (Paulissen *et al.*, 2007). Deze indeling van de vegetatie is inmiddels vervangen door een indeling in natuurbeertypen gekoppeld aan het NNN¹ en een indeling van habitattypen gekoppeld aan Natura 2000-gebieden². In bijlage V is een tabel opgenomen waarin de natuurdoeltypen staan vermeld, met daarbij corresponderende habitattypen en natuurbeertypen.

Binnen de Natura 2000-gebieden zijn er vijf binnendijkse habitat(sub)typen die een vegetatie hebben waarvoor zout een belangrijke rol speelt (1310A, 1310B, 1320, 1330B, 6430B). Het habitatype 6430_B ligt relatief veel meer in het zoete bereik en komt daardoor ook ver van de kust voor. De andere habitattypen komen uitsluitend in kustnabije gebieden voor (nl. Zeeland, Zuid-Holland, Noord-Holland, Friesland, Groningen). Daarnaast zijn er veel habitattypen die gebonden zijn aan zoete milieus maar hinder kunnen ondervinden wanneer ze onder invloed van zouter water komen te staan.

1 Zie <https://www.bij12.nl/onderwerp/natuursubsidies/index-natuur-en-landschap/natuurtypen/>.

2 Zie <https://www.natura2000.nl/beschermde-natuur/habitattypen>.

KADER 2.1 VOORBEELDEN VAN ONDERVERDELING AQUATISCHE NATUUR (KRW) RELEVANT VOOR HET AFWEGINGSKADER

Permanent brakke gebieden

In brakke wateren zijn verschillen in zoutgehalte leidend voor de KRW-typologie. Zwak brakke en matig brakke wateren (namelijk: M30 en M31) hebben een vaak sterk wisselend zoutgehalte, en vinden we vooral in het zeekleigebied en lokaal in het laagveengebied. Hieronder worden wateren verstaan met grote verschillen in vormgeving: kreekrestanten, inlagen, poelen en welen, plassen, sloten, kanalen, jonge duinplassen en incidenteel door getijdenwater overspoelde dobben en plassen op kwelders. Een voorbeeld van dergelijke wateren zijn de waterlopen in de Yerseke Moer. Tot grote brakke tot zoute meren (M32) worden de zoute, afgesloten zeearmen gerekend, zoals de Grevelingen en het Oostvoornse Meer. Deze meren behoorden vroeger tot een open estuarium en zijn door afsluiting veranderd in diepe, stilstaande meren. Vanwege deze diepte treedt regelmatig temperatuurstratificatie op, waardoor er tijdens de zomermaanden vaak geen uitwisseling van water optreedt met water in diepere delen van het meer. Dit kan ook optreden in diepere brakke waterlopen. Het gevolg van de temperatuurstratificatie is dat er op grote schaal zuurstofloosheid op de waterbodem kan optreden, wat ten koste gaat van veel macrofauna- en vissoorten.

Voorheen brakke/zoute gebieden die nu (deels) verzoet zijn

Tot deze deels verzoete wateren behoort het KRW-type M01b (Niet zoete gebufferde wateren, zomerhalfjaar chlorideconcentratie 150 – 1.000 mg chloride/l). Hiertoe behoren veel wateren die in het zeekleigebied zijn gelegen, als ook wateren in de voormalige brakwatervenen in Noord-Holland. Deze gebieden hebben een brakke ontstaansgeschiedenis, maar zijn door de aanvoer van zoet water van elders gaandeweg verzoet. Voorbeelden van deze wateren zijn vele sloten en kanalen in de zeekleigebieden van laag-Nederland. Deze wateren kenmerken zich door grote fluctuaties in het zoutgehalte door het jaar heen. Bovendien zijn er vaak ook grote verschillen in zoutgehalte tussen de waterbodem en de bovenstaande waterlaag. Dit geldt vooral voor wateren die nog steeds brakke kwel ontvangen vanuit de ondergrond (waardoor de waterbodem brak is), terwijl ze tegelijkertijd worden doorspoeld door zoet water. Deze verschillen in zoutgehalte (zowel in ruimte als in de tijd) resulteren in een grote osmotische stress voor veel soorten. Bovendien liggen deze wateren vaak in intensieve landbouwgebieden, waardoor er ook een hoge nutriëntenbelasting is. Slechts een klein aantal plantensoorten is bestand tegen dergelijk extreme condities.

Wanneer deze wateren in inrijgebieden zijn gelegen, dan kan het water volledig zijn verzoet. In deze gevallen kan een KRW-type met een 'zoet' karakter zijn toegekend aan het watersysteem. Een voorbeeld hiervan is in het Wormer- en Jisperveld in de kop van Noord-Holland boven Amsterdam of het KRW waterlichaam Bath Oost. Dit gebied behoorde vroeger tot een brak laagveen, maar is als een 'zoet' KRW-type (M10: Laagveenvaarten en – kanalen) geclassificeerd. Ook bij volledig verzoete condities laat de ontstaansgeschiedenis zich vaak nog gelden, omdat in veel gevallen de ammonium- en sulfaatconcentraties nog wel duidelijk verhoogd zijn (vanwege de vroegere mariene invloed). Dit heeft nog steeds een grote invloed op de waterkwaliteit en vegetatiesamenstelling.

Oorspronkelijk zoete wateren

Tot oorspronkelijk zoete wateren kunnen een groot aantal KRW-typen gerekend worden. Dit omvat verschillende meren, sloten en kanalen (zie hierboven). Voorbeelden van deze wateren zijn de vele sloten en kanalen in het meer landinwaarts gelegen laagveen-gebied in Laag-Nederland (zoals polder Demmerik nabij Vinkeveen), en plassen zoals de Nieuwkoopse plassen en Reeuwijkse plassen. Hierbij is het belangrijk dat deze gebieden niet eerder in aanraking zijn geweest met brak water, ook niet toen het gebied ontstond. Als gevolg hiervan kan (tijdelijke) toevoer van brak water tot een sterke reactie van het systeem leiden. Dit is niet alleen het gevolg van verhoogde zoutgehalten (die tot osmotische stress kunnen leiden), maar ook van de hogere sulfaat- en ammoniumconcentratie in het brakke water. De aanvoer van deze stoffen kan tot interne eutrofiering leiden, evenals de vorming van toxische stoffen als sulfiden. Met name wateren in laagveengebieden zijn hier sterk gevoelig voor, vanwege de grote voorraad aan (relatief gemakkelijk afbreekbaar) organisch materiaal.

TABEL 2.3

BINNENDIJKSE HABITATTYPEN WAARBIJ ZOUT EEN BELANGRIJKE ROL SPEELT

Habitatcode	Omschrijving
1310_A	zilte pionier begroeiingen (zeekraal)
1310_B	zilte pionier begroeiingen (zeevetmuur)
1320	slijkgrasvelden
1330_B	schorren en zilte graslanden (binnendijks)
6430_B	ruigten en zomen (harig wilgenroosje)

Binnen het NNN wordt N12.04 Zilt- en overstromingsgrasland onderscheiden. Dit zijn vegetaties met grassen, russen en kruiden op vochtige zand-, veen- en kleigronden. Overstromingsgrasland kent in de winter en het voorjaar vrijwel jaarlijks een periode dat het overstromd is door water. Hoewel het om zoetwater systemen kan gaan, wordt bij dit type aangegeven dat het ook gaat om zilte graslanden die (incidenteel) onder invloed staan van brak of zout water, zonder dat er sprake is van getijde.

Een bekend fenomeen is lokale verzilting van de bermflora langs wegen door strooizout. Diverse soorten komen door het gebruik van strooizout ook veel verder landinwaarts voor. Dit geldt bijvoorbeeld voor soorten als Deens lepelblad, hertshoornweegbree, zilte rus, Engels gras en zilte greppelrus.

Evenals bij de aquatische natuur, zijn er binnen de terrestrische natuur veel verschillen in zoet-zout dynamiek en is het niet mogelijk om simpelweg te spreken van zoete gebieden en zoute gebieden. Sommige gebieden, bijvoorbeeld in Zeeland en langs de voormalige Zuiderzee, zijn onder brakke/zoute omstandigheden gevormd, maar in de loop der tijd verzoet door ons waterbeheer. Tegelijkertijd zijn er gebieden die onder normale omstandigheden zoet zijn, maar door kwel en inlaat van zoutwater soms tijdelijk verzilten. Daarom wordt in dit project onderscheid gemaakt tussen de volgende situaties die relevant zijn voor het afwegingskader onderdeel terrestrische natuur:

1. permanent brakke gebieden, eventueel met zoete invloeden;
2. voorheen brakke/zoute gebieden die nu (deels) verzoet zijn;
3. gebieden die oorspronkelijk zoet zijn, en die nu blootgesteld kunnen worden aan zout(pulsen).

Dit is dezelfde onderverdeling zoals die van de aquatische natuur (KRW). In Kader 2.2. zijn deze drie situaties voor de terrestrische natuur verder toegelicht met voorbeelden uit de Nederlandse context. Voor wat betreft de hersteltijd kan een onderscheid worden gemaakt in abiotisch herstel en biotisch herstel. Abiotisch herstel is de tijdsduur nodig na een ingreep om terug te keren naar het zoutgehalte in de bodem en het grondwatersysteem waarbij de beoogde doelsoorten c.q. doelen (natuurbeheertypen en habitattypen) weer mogelijk zijn. Biotisch herstel is de tijd die nodig is voor de terugkeer van doelsoorten naar het oude niveau voor ingreep. De totale hersteltijd is dan de som van de abiotische en biotische hersteltijd. Biotische hersteltijd is wat lastiger vast te stellen aangezien de terugkeer van de doelsoorten en/of doeltypen van meer factoren kan afhangen dan van het zoutgehalte. Meestal wordt spontaan herstel van de vegetatie niet afgewacht en vinden er ingrepen plaats om terugkeer van doelsoorten te bespoedigen (bijvoorbeeld door doelsoorten actief opnieuw te introduceren in een gebied).

KADER 2.2 VOORBEELDEN VAN ONDERVERDELING TERRESTRISCHE NATUUR RELEVANT VOOR HET AFWEGINGSKADER

Permanent brakke gebieden, eventueel met een zoete invloeden

Een voorbeeld van een permanent brak gebied met zoet invloeden is het Natura 2000-gebied Yerseke en Kapelse Moer. Dit gebied kent veel brakke terrestrische natuur. Het gebied heeft last van verdroging en er is een waterbehoefte om veenafbraak tegen te gaan. Hier speelt discussie over of de inlaat uit zout of zoet water moet bestaan. Daarnaast kent Zeeland veel zilte graslanden. De hoogteligging en de mate waarin deze graslanden in contact staan met brak grondwater bepaalt of er sprake is van verzoeting of verzilting. Verder zijn er buitendijkse gebieden waar relatief recent verzoeting is opgetreden. Een voorbeeld van een meer recente verzoeting van een zilt gebied is de Markiezaat. Sinds de scheiding van de Oosterschelde in 1983 is het Markiezaat een brak meer dat steeds meer verzoet. Hoger gelegen gronden raakten snel hun zout kwijt door uitspoeling (neerslag).

Voorheen brakke/zoute gebieden die nu (deels) verzoet zijn

Verzoeting van brakke/zoute gebieden is in het verleden op grote schaal opgetreden door aanleg van dijken en droogmakerijen. Zo waren er rond 1300 veel brak wateren aanwezig in Noord-Holland wat nu is drooggemalen. Daarnaast is sinds 1928 de Zuiderzee afgesloten en is het IJsselmeergebied ontstaan. Daarmee hoorde de grootschalige overstromingen vanuit de Zuiderzee tot het verleden en was er veel zoetwater aanwezig wat vanuit het IJsselmeer kon worden ingelaten naar het achterland. Dit heeft tot een verdere verzoeting geleid van voormalig brakke gebieden in Noord-Holland en Friesland. De hele noordwestkust van Friesland kon bij stormen overstromen, waardoor daar verzilting optrad (bijvoorbeeld Kerstvloed van 1717). Daarnaast was in het noordwesten van Friesland rond 1000 jaar na Chr de Middellzee aanwezig. Deze zeearm is vanaf 1100 gaan dichtslippen en thans grotendeels verzoet dankzij het neerslagoverschot en zoetwater vanuit het IJsselmeer. In Zeeland komt nog relatief veel brak grondwater voor, maar ook dit gebied is verzoet. Rond 800 na Chr is Zeeland ingesneden door vele zeekeken. Ook waren er veelvuldig overstromingen vanuit de zee. Met het versterken van de dijken en uiteindelijk de Deltawerken trad een verzoeting op. Veel voormalige keken zijn opgevuld met zandig materiaal waardoor daar de bodem minder inklonk dan op de kleigronden (Van Baaren *et al.*, 2016). Er trad reliëf-inversie op met kreekruggen die nu hoger liggen dan de kleigronden (poelgronden). De kreekruggen zijn gaan verzoeten en bevatten een dikke zoetwaterbel. De poelgronden hebben een relatief dunne zoetwaterlens en zijn kwetsbaar voor verzilting.

Door seaspray in de kustzone kan zout in terrestrische natuurgebieden komen. De meest seaspray beperkt zich echter tot een smalle zone langs de kust (Jansen, 1998).

Gebieden die oorspronkelijk zoet zijn, en die nu blootgesteld kunnen worden aan zout(pulsen)

Gebieden die van oorsprong zoet zijn, kunnen nu onder invloed staan van de inlaat van extern water. In het verleden ging het vooral om Rijnwater wat verhoogde zoutconcentraties had als gevolg van de Franse kalimijnen. Deze kalimijnen zijn inmiddels gesloten waardoor het zoutgehalte in de Rijn is afgenomen. Tegenwoordig is vooral inlaat tijdens droogte een risico, doordat tijdens droogte waterpeilen dalen waardoor er een waterbehoefte ontstaat, maar waardoor ook zeewater verder kan binnendringen in ons oppervlaktewatersysteem (externe verzilting).

Wanneer dit water wordt ingelaten in obligaate zoete ecosystemen dan kan dat leiden tot verlies van kenmerkende soorten. Er is een samenhang met de verdrogingsproblematiek, aangezien dalende peilen deels veroorzaakt worden door verdroging. Er ontstaat dan een dilemma tijdens droogte: moeten we water inlaten van mindere kwaliteit voor behoud van het waterpeil of is het verstandiger om dat water van mindere kwaliteit niet in te laten omdat het meer schade toebrengt aan het ecosysteem dan de lage peilen ('verdrogen of vervuilen'). In deze rapportage gaan we hoofdzakelijk in op verzilting en verzoeting en niet op verdroging. Ook in het afwegingskader, waar deze kennisrapportage aan ten grondslag ligt, wordt niet ingegaan op de gevolgen als er geen water wordt ingelaten, maar puur op wat de effecten zijn van zout.

LANDBOUW

De Nederlandse landbouw bestaat uit veel verschillende vormen en teelten en is regionaal verschillend. Om voor het zoet-zout vraagstuk tot een afbakening te komen tussen de verschillende relevante vormen van landbouw, zijn we uitgegaan van de indeling van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS)³. Het CBS gaat onder andere uit van akkerbouw, tuinbouw en grasland (samen met groenvoergewassen). Bij akkerbouw zijn belangrijke gewassen onder andere aardappel, uien, tarwe en suikerbieten. Het CBS maakt daarnaast ook nog een onderscheid tussen akkerbouwgroenten (zoals uien en peen) en tuinbouwgroenten (zoals kolen, asperges en prei). De tuinbouw (open teelt) bestaat verder uit bollenteelt, (boom)kwekerijen en fruit zoals appel en peren. Bij grasland wordt er geen onderscheid gemaakt tussen verschillende soorten gras en groenvoergewassen bestaat hoofdzakelijk uit snijmaïs.

Als we kijken naar de provincies die het meeste te maken hebben met verzilting, dan hebben we het over: Zeeland, Noord-Brabant, Zuid-Holland, Noord-Holland, Flevoland, Friesland en Groningen. Voor deze provincies geldt dat het merendeel van de landbouwgrond (tabel 2.4) wordt gebruikt als grasland en groenvoergewassen (1.153.000 ha), gevolgd door akkerbouw (547.500 ha) en tuinbouw (open grond; 92.500 ha). Er zijn aanzienlijke verschillen in agrarisch grondgebruik tussen de provincies. Zo is het merendeel van het agrarisch gebruik in Friesland, Noord-Brabant en Noord- en Zuid-Holland voor grasland en groenvoedergeassen en is akkerbouw vooral aanwezig in Flevoland, Groningen en Zeeland. De meeste tuinbouw vindt plaats in Noord-Brabant en Noord-Holland.

3 Bron CBS voor 2023; <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/80780ned/table?ts=1718178417557>.

TABEL 2.4

OVERZICHT VAN HET AANTAL HA AKKERBOUW, TUINBOUW (OPEN TEELT) EN GRASLAND (INCLUSIEF GROENVOERGEWASSEN) IN NEDERLAND (IN 2023, DATA CBS), UITGESPLITST NAAR DE PROVINCIES DIE HET MEEST TE MAKEN HEBBEN MET VERZILTING

	Akkerbouw (ha)	Tuinbouw (open grond) (ha)	Grasland en groenvoergerwassen (ha)
in Nederland	547.500	92.500	1.153.000
per provincie:			
Flevoland	61.000	7.950	19.500
Friesland	23.000	1.600	200.000
Groningen	85.000	1.100	72.500
Noord-Brabant	77.000	18.000	138.500
Noord-Holland	30.500	20.500	74.000
Zeeland	85.000	6.500	27.000
Zuid-Holland	35.500	7.500	69.000

Aangezien elke vorm van landbouw (akkerbouw, tuinbouw, grasland, en dergelijke.) bestaat uit diverse gewassen (in wisselteelt) en deze gewassen vaak verschillen in de mate van zouttolerantie, is het in principe niet mogelijk om te praten over een bepaald niveau van zouttolerantie per landbouwworm of agrarisch grondgebruik. In plaats daarvan wordt gekeken naar de individuele gewassen.

In dit project kijken we alleen naar de top 10 van gewassen voor de provincies uit tabel 2.4 gebaseerd op het jaar 2023, rekening houdend met een logische rotatie van wisselteelten (hoeveelheden zijn totaal aantal ha gewas in de 7 meegenomen provincies):

- grasland (507.500 ha);
- tarwe (109.500 ha);
- aardappel (109.000 ha);
- snijmaïs (82.500 ha);
- suikerbiet (55.000 ha);
- ui (31.000 ha);
- gerst (19.000 ha);
- tulp (14.500 ha);
- peer (5.500 ha);
- lelie (3.000 ha).

In aanvulling daarop wordt als 11^e doelgewas ‘boomteelt’ meegenomen. Boomteelt gaat over meerjarige teelt, in tegenstelling tot de bovenstaande top 10 doelgewassen, waardoor er meer dan bij enkeljarige gewassen een belang is voor meerjarig gunstige condities voor wat betreft het zoutgehalte.

Voor wat betreft de hersteltijd hanteren we een vergelijkbare definitie als voor de natuur: we maken een onderscheid tussen de abiotische hersteltijd (de tijdsduur waarin het zoutgehalte en samenhangende abiotische factoren de doelgewassen in theorie weer kunnen ondersteunen) en de biotische hersteltijd (de tijdsduur die het kost voor gewassen om daadwerkelijk weer te groeien. In de natuur hangt dit onder ander af van hoe gebieden met elkaar verbonden zijn en of er nog geschikte standplaatsen zijn. In de landbouw worden doelgewassen door de mens geplaatst, waardoor de biotische hersteltijd waarschijnlijk zeer beperkt zal zijn.

SAMENVATTING

Hieronder staat het overzicht van functies en onderverdeling van gebieden en landbouwgewassen die in dit project worden beschouwd.

TABEL 2.5 OVERZICHT INDELING NATUUR- EN LANDBOUWGEBIEDEN DIE RELEVANT ZIJN VOOR HET AFWEGINGSKADER OVER HOE OM TE GAAN MET ZOET-ZOUT DYNAMIEK IN DE NEDERLANDSE CONTEX

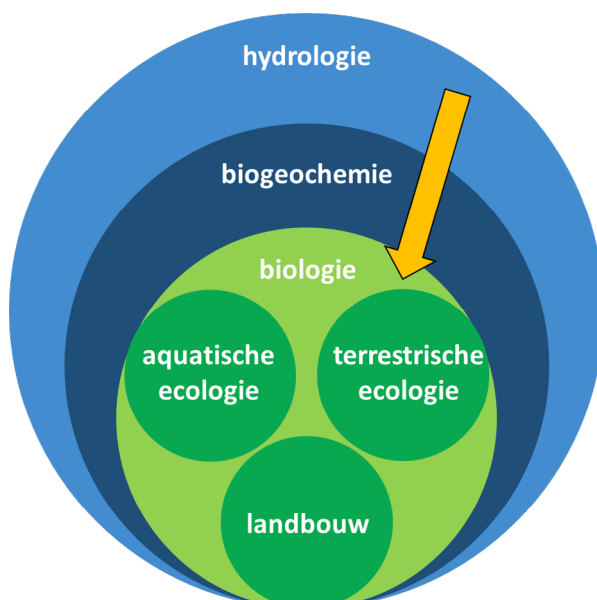
Functie	Situaties/gebieden/gewassen die relevant zijn voor het afwegingskader
aquatische natuur	permanent brakke gebieden, eventueel met een zoete invloed voorheen brakke/zoute gebieden die nu zoet zijn in zoet ontstaan, nu blootgesteld aan zout (pulsen)
terrestrische natuur*	permanent brakke gebieden, eventueel met een zoete invloed voorheen brakke/zoute gebieden die nu zoet zijn in zoet ontstaan, nu blootgesteld aan zout (pulsen)
landbouw	Grasland, Tarwe, Aardappel, Snijsmaïs, Suikerbiet, Ui, Gerst, Tulp, Peer, Lelie en boomteelt

* Relevante natuurdoeltypen zijn opgesomd in bijlage V.

2.4 WERKWIJZE

In dit project is een systeemanalytische aanpak gehanteerd. Dit wil zeggen dat we de eigenschappen en processen beschouwen die relevant zijn voor het systeemfunctioneren van natuur- en landbouwgebieden in het kader van de zoet-zout dynamiek. Aan de basis staat de hydrologie, die nodig is om te bepalen hoe en onder welke omstandigheden zoet-zout dynamiek optreedt. Zo kunnen we bepalen waar het zout terecht komt. Het zoutgehalte werkt vervolgens via de biogeochemie (en in combinatie met de hydrologie) weer door op de biologie. Dit denkkader is nodig om uiteindelijk te kunnen onderbouwen hoe zoet-zout dynamiek en mogelijke hersteltijd doorwerkt op de aquatische natuur, de terrestrische natuur en de landbouw.

AFBEELDING 2.1 SCHEMATISCH OVERZICHT VAN HET SYSTEEMFUNCTIONEREN OP HOOFDSCHAAL ALS DENKKADER OM DE EFFECTEN VAN ZOET-ZOUT DYNAMIEK TE KUNNEN DUIDEN OP DE AQUATISCHE EN TERRESTRISCHE NATUUR EN DE LANDBOUW



2.5 LEESWIJZER

Deze kennisrapportage is als volgt opgebouwd:

- hoofdstuk 3 geeft een overzicht van hoe zoet / zout invloeden hydrologisch doorwerken in het (water)systeem en welke effecten deze doorwerking heeft op de biogeochemie en op de ecologie van landbouwgewassen, terrestrische natuur en onderwaterleven;
- hoofdstuk 4 beschrijft welke effecten van zoet-zout dynamiek spelen bij de aquatische ecologie (KRW), wat dit betekent voor de hersteltijd en welke kennislücken er nog zijn;
- hoofdstukken 5 & 6 beschrijven hetzelfde, maar dan voor de terrestrische ecologie (hoofdstuk 5) en de landbouw (hoofdstuk 6);
- de conclusie wordt gegeven in hoofdstuk 7.

3

ZOET-ZOUT DYNAMIEK EN INVLOEDEN

3.1 INLEIDING

In hoofdstuk 2 is het vraagstuk zoet-zout dynamiek afgebakend. Om het vraagstuk goed te doorgronden, is het noodzakelijk om dieper in te gaan op hoe de invloeden van zoet en zout doorwerken in het grond- en oppervlaktewater, de bodem(chemie) en uiteindelijk op de biologie (landbouw: gewassen; terrestrische natuur: habitattypen; aquatische natuur: waterplanten en vissen). Bijgaand hoofdstuk brengt deze verdieping. Hier wordt stilgestaan bij de volgende onderdelen:

- zout:
 - welke onderverdeling van zoutgehalte wordt toegepast voor de drie functies (aquatische natuur, terrestrische natuur en landbouw)?
- hydrologie:
 - hoe werken schommelingen in zoutgehalte (verzilting van zoete gebieden en verzoeting van zoute/brakke gebieden) door in het grond- en oppervlaktewatersysteem?
 - waar komt het zoutwater in zoete gebieden (verzilting) en zoetwater in zoute gebieden (verzoeting) terecht?
- biogeochemie:
 - welke biogeochemische interacties hangen samen met een verhoging of verlaging van zoutgehalte?
- biologie:
 - hoe werken zout en daarmee samenhangende biochemische interacties door op de biologie (aquatische natuur: waterplanten en vissen; terrestrische natuur: habitattypen; landbouw: gewassen)?

3.2 ZOUT

Om gebieden met elkaar te kunnen vergelijken en effecten van de zoet-zout dynamiek te kunnen duiden, is het belangrijk om grenswaarden te definiëren voor wat wordt verstaan onder zoet, zout en alle gradaties daartussen. In de afbakening in hoofdstuk 2 is reeds beschreven dat er verschillende manieren zijn om het zoutgehalte te meten en uit te drukken (bijvoorbeeld: EC-waarde, chloridegehalte, Ece-waarde). Voor de landbouw is bijvoorbeeld de gevoeligheid voor zout van geteelde gewassen belangrijk voor de bepaling van grenswaarden. Voor de aquatische en terrestrische natuur wordt gekeken naar wat zout betekent voor de stress die aquatische en terrestrische soorten ervaren en hoe dit zich vertaalt in bijvoorbeeld habitattypen en doelsoorten per KRW-type.

In Nederland wordt gebruikt gemaakt van zowel 'EC' als chloride gehalte, maar deze zijn niet eenvoudig in elkaar om te schrijven (tabel 3.1), omdat de EC-waarde door meer dan alleen het chloridegehalte wordt bepaald. Met name bij lage zoutgehaltes ($EC < 2$ dS/m; $Cl < 500$ mg Cl/l) is de correlatie moeilijk te maken, terwijl dit juist het bereik is dat voor veel vraagstukken in de landbouw en natuur relevant is. Door dit duidelijk weer te geven wordt het risico op misinterpretatie van literatuur en toepassing van beleid klein gehouden.

De in Nederland gebruikte correlaties (tabel 3.1) laten uiteenlopende resultaten zien. Dit maakt inzichtelijk dat rekening gehouden moet worden met een bandbreedte binnen de omrekeningen van EC-waardes naar chloride concentraties en omgekeerd. Binnen het Nederlandse waterbeleid, dat op chloride is gebaseerd, moet deze omrekenstap gemaakt worden, omdat de meeste data en literatuur over zouttolerantie in EC worden gerapporteerd. Dit laatste is met name voor de landbouw het geval.

TABEL 3.1 OVERZICHT VAN DE RELATIE TUSSEN EC (ELEKTRISCHE CONDUCTIVITEIT) EN DE CHLORIDE CONCENTRATIE IN WATER, OP BASIS VAN 5 VERSCHILLENDE BRONNEN. DE LAATSTE KOLOM GEEFT HET GEMIDDELDE VAN DE 5 BRONNEN, AFGEROND OP HET DICHTBIJ ZIJNDE VIJFTIGTAL. WAARDES KLEINER DAN 2 DS/M ZIJN LASTIG OM TE REKENEN NAAR CHLORIDE, DUS DE BEREKENDE CHLORIDE CONCENTRATIES BIJ 0,7 EN 1,5 DS/M KUNNEN MOGELIJK STERK AFWIJKEN IN BEPAALDE GEVALLEN

EC (in dS/m)	Chloride (mg Cl/l)					Gemiddeld
	Deltares ¹	De Vos <i>et al.</i> ²	BMW ³	Van Dam <i>et al.</i> ⁴	CTV ⁵	
0.7		142		106	95	100
1.5		366		290	257	300
2.0	270	523		423	374	400
2.5	450	691	649	567	502	550
3.0	630	867	830	721	637	750
4.0	990	1.240	1.191	1.052	928	1.100
7.5	2.250	2.710	2.456	2.405	2.115	2.400

¹ <https://publicwiki.deltares.nl/display/ZOETZOUT/Conversion+EC+to+Chloride>.

² De Vos *et al.*, 2016.

³ Website Boeren Meten Water (BMW); <https://boerenmetenwater.nl/ec-tabel-schetst-zouttolerantie/>.

⁴ Van Dam *et al.*, 2007, uit bijlage 1, tabel 1.

⁵ Cultuurtechnisch Vademecum, 1988.

Op basis van de gemiddelde waardes in tabel 3.1 kan de volgende formule worden opgesteld om EC en chloridegehalte in elkaar om te zetten. Let wel, met name voor lage zoutgehaltes (EC <2 dS/m) dient rekening gehouden te worden met een zekere bandbreedte vanwege de moeilijke correlatie tussen EC en chloridegehalte.

$$\text{Chloridegehalte} = 165 * \text{EC}^{1.3438} \quad (3.1)$$

Met inachtneming van bovenstaande wordt in deze paragraaf de onderverdeling naar zoutklassen per functie (aquatische natuur, terrestrische natuur en landbouw) nader toegelicht.

3.2.1 ZOUTKLASSEN VOOR DE AQUATISCHE EN TERRESTRISCHE NATUUR

Voor de aquatische en terrestrische natuur worden de zoutklassen normaliter in chlorositeit of saliniteit uitgedrukt en worden dezelfde klassen gehanteerd (tabel 3.2). Voor bijna alle onderzochte natuurdoeltypen ligt de optimale chlorideconcentratie in het zeer zoete bereik (<150 mg Cl/l) en de norm in het zoete tot licht brakke bereik (<1000 mg Cl/l). Dit geldt voor planten en terrestrische ongewervelden. De Waternood applicatie (Runhaar *et al.*, 2014) onderscheidt de onderstaande zoutklassen. De indeling sluit redelijk goed aan op eerdere oude indelingen.

TABEL 3.2 GRENSWAARDEN VOOR DE INDELING VAN ZOUTGEHALTE OP BASIS VAN CHLOROSITEIT EN SALINITEIT VOOR TERRESTRISCHE NATUUR

Zoutklasse	Type	Chlorositeit (mg Cl/l)	Saliniteit (‰)
zeer zoet	infrahalien	150	<0,25
zoet	limnetisch	300	<0,5
zwak brak	oligohalien	300 - 1.000	0,5 - 1
licht brak	mesohalien	1.000 - 3.000	1 - 3
matig brak	mesohalien	3.000 - 10.000	3 - 10
sterk brak	polyhalien	10.000 - 17.000	10 - 30
zout	euhalien	>17.000	>30

Overigens merken Runhaar *et al.* (1997) voor waterplanten op dat de meeste soorten een eenzijdige responsie laten zien ten aanzien van saliniteit (Runhaar *et al.*, 1997). Er is een duidelijke bovengrens waarboven bepaalde soorten niet meer voorkomen (de bovengrens verschilt per soort), maar er zijn nauwelijks soorten die lage zoutgehaltes mijden. Dus soorten die tolerant zijn voor verhoogde saliniteit kunnen ook voorkomen bij lagere chloridegehaltes, maar doen dit in de natuur weinig door bijvoorbeeld concurrentie van obligaat zoete soorten. Alleen *Ruppia*-soorten zijn exclusief aangetroffen in brak water.

Iets vergelijkbaars gaat op voor terrestrische vaatplanten. Stuyfzand (1993) heeft een hydrochemische indeling gemaakt voor grondwater waarbij, afhankelijk van het chloridegehalte, enkele hoofdtypen zijn onderscheiden (tabel 3.3). Deze indeling zou een betere identificatie mogelijk maken van onder andere kationuitwisseling en de effecten van verzuring en overbemesting. De indeling heeft dus ook ecologische relevantie. Stuyfzand noemt F, f, B, b, S en H als de 6 hoofdtypen (tabel 3.3).

TABEL 3.3 INDELING VOLGENS STUYFZAND VOOR GRONDWATER OP BASIS VAN CHLORIDECONCENTRATIE. DE LETTERCODES SYMBOLISEREN DE 6 HOOFDTYPEN

Code	Betekenis	Chloride concentratie (mg Cl/l)
G	very oligohaline (zeer arm aan zout)	0 - 5
g	oligohaline (oligohalien)	5 - 30
F	fresh (zoet)	30 - 150
f	fresh-brackish (brakker dan zoet)	150 - 300
B	brackish (brak)	300 - 1.000
b	brackish-saline (zouter dan brak)	1.000 - 10.000
S	saline (zout)	10.000 - 20.000
H	hypersaline (erg zout)	>20.000

3.2.2 ZOUTKLASSEN VOOR DE LANDBOUW

Het is voor de landbouw belangrijk een onderscheid te maken tussen zoutconcentraties van (irrigatie/beregenings-)water en bodemzoutconcentraties. Lage waarden zijn voor de landbouw het meest relevant, maar dit zijn precies de waarden waarbij de correlatie tussen chloride en EC onduidelijk is (tabel 3.1). Bij lage EC-waarden, onder de 2 dS/m, zijn bicarbonaat en sulfaat over het algemeen dominant. Bij hogere EC-waarden zijn Na⁺ en Cl⁻ meestal dominant, en dat zijn ook de ionen (vooral Na⁺) die de meeste negatieve effecten op zowel gewassen als bodemstructuur hebben.

Hieronder worden de verschillende classificaties voor (irrigatie)water en bodemtype toegelicht.

CLASSIFICATIE VAN (IRRIGATIE/BEREGENINGS)WATER

Irrigatie en beregening is in principe hetzelfde. In beide gevallen gaat het om het toevoegen van water aan landbouwgewassen bij een tekort aan neerslag, met behulp van technische middelen. Soms wordt beregening gezien als het toevoegen van water van bovenaf (waterkanon, sproeiboom) en irrigatie wordt vaak geassocieerd met druppelirrigatie, maar officieel is er geen verschil tussen beregening en irrigatie. In de rest van dit document wordt in principe de term irrigatie gebruikt wanneer we het hebben over het actief toevoegen van water aan landbouwgewassen.

Een classificatie van (irrigatie)water op basis van EC is niet universeel beschikbaar. Op basis van expertise is tabel 3.4 opgesteld, waarin een algemene indeling wordt gegeven voor de classificatie van (irrigatie)water. Het uitgangspunt is dat water met een EC van 0,7 dS/m of lager als 'zoet' kan worden aangeduid. Over het algemeen kan water tot 1,5 dS/m worden gebruikt voor irrigatie. Echter, als de verhoogde EC van 1,5 dS/m wordt veroorzaakt door natrium of chloride, dan kunnen voor (zeer) gevoelige gewassen problemen optreden. Een EC tussen de 1,5 en 3 dS/m wordt aangemerkt als licht brak. Binnen deze bandbreedte kunnen gevoelige gewassen schade ondervinden en bij hoogfrequent van irrigatiewater met deze waarden kan zoutophoping plaatsvinden in de bodem. Zoutophoping heeft mogelijk structurele schade in de bodem als gevolg. Structurele irrigatie met een EC vanaf 3,0 dS/m heeft een grote kans op schade aan het gewas.

TABEL 3.4 GLOBALE CLASSIFICATIE VAN (IRRIGATIE)WATER OP BASIS VAN DE ZOUTCONCENTRATIE (EC-WAARDE EN CHLORIDE CONCENTRATIE) EN DE MOGELIJKE EFFECTEN OP GEWAS EN BODEM VOOR DE FUNCTIE LANDBOUW

Zoutconcentratie (EC - dS/m)	Zoutconcentratie (mg Cl/L)	Classificatie	Mogelijke effecten op gewassen	Mogelijke effecten op de bodem
<0.7	100*	Zoet	geen negatieve effecten te verwachten	geen negatieve effecten te verwachten
0.7 - 1.5	100 - 300*	Zoet tot licht brak	alleen zeer gevoelige gewassen kunnen last krijgen	bij veelvuldig gebruik kan zoutophoping in de bodem plaatsvinden
1.5 - 3.0	300 - 750	Licht brak	gevoelige gewassen kunnen last krijgen, ook bij kortdurende irrigatie	zoutophoping in de bodem kan plaatsvinden, mogelijke structurele schade van klei bodems
3.0 - 7.5	750 - 2.400	Brak	alleen tolerante gewassen geschikt	alleen geschikt voor zandige bodems en sommige zavelgronden, hoge mate van uitspoeling noodzakelijk
>7.5	>2.400	Sterk brak	alleen zeer tolerante gewassen geschikt	alleen geschikt voor zandige bodems en sommige zavelgronden, hoge mate van uitspoeling noodzakelijk

* EC-waardes kleiner dan 2 dS/m zijn lastig om te rekenen naar chloride concentraties, dus deze getallen zijn relatief onnauwkeurig.

CLASSIFICATIE VAN DE BODEM

De classificatie van bodem is anders dan voor water. Kalium en sulfaat worden bijvoorbeeld gebruikt als meststoffen, terwijl dit ook zouten zijn die kunnen bijdragen aan een verhoogde EC. Ook voor bodem bestaan diverse classificaties, maar een gangbare versie gaat ervan uit dat een bodem met een EC van 2 dS/m of lager als zoet beschouwd wordt. Ter vergelijking, voor water is dit 0,7 dS/m.

In onderstaande tabel wordt een algemene classificatie van bodemzoutconcentraties gegeven. Op basis van de eerdere relatie tussen chloride en EC is ook een chlorideconcentratie berekend.

TABEL 3.5 GLOBALE CLASSIFICATIE VAN DE BODEM OP BASIS VAN DE ZOUTCONCENTRATIE (GEMETEN ALS ECE) EN DE MOGELIJKE EFFECTEN OP GEWASSEN. DE ZOUTCONCENTRATIE IN MG CL/L IS BEREKEND OP BASIS VAN DE RESULTATEN VAN TABEL 3.1

Zoutconcentratie (ECe, in dS/m)	Zoutconcentratie (in mg Cl/l)	Classificatie	Mogelijke effecten op gewassen
<2,0	<400	zoet	kleine kans op negatieve effecten te verwachten
2,0 - 4,0	400 - 1.100	licht zout	gevoelige gewassen en zaailingen kunnen last krijgen
4,0 - 8,0	1.100 - 2.600	matig zout	alleen matig tolerante gewassen geschikt, bij gevoelige gewassen zal schade optreden
8,0 - 12,0	2.600 - 4.250	sterk zout	alleen zouttolerante gewassen geschikt
12,0 - 16,0	4.250 - 6.000	zeer sterk zout	beperkt aantal zeer tolerante gewassen geschikt
>16,0	>6.000	extreem zout	alleen halofyten geschikt voor teelt

Zoals eerder vermeld, wordt de ECe gemeten in een waterextract. Echter, zouten zoals natrium en magnesium kunnen zich ook binden aan organische stof en kleideeltjes (het klei-humus complex of CEC - Cation Exchange Capacity). Als zouten gebonden zijn, worden ze niet gedetecteerd als een verhoogde EC in een waterextract. Daarom is het belangrijk om ook de totale concentraties van verschillende zouten in de bodem te meten. Internationaal bestaan diverse standaarden voor zoutmetingen in de bodem, zoals ESP (Exchangeable Sodium Percentage), SAR (Sodium Adsorption Ratio), en CROSS (Cation Ratio of Soil Structural Stability). Deze indicatoren helpen om de stabiliteit van de bodemstructuur te beoordelen.

Een verhoogde waarde van ESP, SAR, of CROSS wijst op problemen met de bodemstructuur. Deze problemen ontstaan wanneer calcium in het klei-humus complex wordt verdrongen door natrium en hoge concentraties magnesium, wat leidt tot een compactere bodemstructuur. Dit kan problemen veroorzaken met waterinfiltratie en beluchting. Een verzilte kleibodem heeft een laag draagvermogen als deze nat is (machines kunnen wegzakken), en als de bodem droog is, kan hij zo hard worden dat machinaal oogsten onmogelijk is. In de volksmond praten we vaak over verslempde om slempevoelige bodem.

Om een volledig beeld te krijgen van de mate van verzilting van een bodem, dient niet alleen naar de ECe (salinity) gekeken worden, maar ook naar de bodemstructuur (ESP, SAR, CROSS - sodicity). Daarnaast speelt het percentage organische stof een belangrijke rol. Niet alleen kan een hoog organische stof percentage zorgen voor enige binding van de zouten (waardoor ze dus niet meer vrij beschikbaar zijn voor opname door planten), maar het zorgt ook voor een betere binding tussen bodemdeeltjes. Een bodem met een hoog calciumpercentage en een hoog organisch stof percentage heeft daarom een hoger bufferend vermogen en zal minder snel structuurschade ervaren door verzilting.

TABEL 3.6

CLASSIFICATIE VAN BODEM OP BASIS VAN ECE, PH, SAR (SODIUM ADSORPTION RATIO), CROSS (CATION RATIO OF SOIL STRUCTURAL STABILITY) EN ESP (EXCHANGEABLE SODIUM PERCENTAGE), OP BASIS VAN FAO & ICBA, 2023. OP BASIS VAN DEZE WAARDES KAN EEN BODEM WORDEN INGEDEELD ALS 'SALINE', 'SODIC' OF DE COMBINATIE VAN DE TWEE

Classificatie	E _{ce} (in dS/m)	pH	SAR / CROSS	ESP
optimaal	<4,0	6,5 -7,0	<13	<15
verhoogde pH	<4,0	>7,8	<13	<15
'saline'	>4,0	<8,5	<13	<15
'saline-sodic'	>4,0	<8,5	≥13	≥15
'sodic'	<4,0	>8,5	≥13	≥15

AANBEVELING HOE OM TE GAAN MET ZOUTGEHALTE

Het omzetten van EC naar chloride moet veel gebeuren voor de toepassing van normen in de landbouw. Om deze reden is het aan te bevelen om de correlatie tussen EC-waarde en chloride beter te onderzoeken en nauwkeurig uit te werken. Een landelijke overstap van chloridenormen naar het gebruik van EC-waardes is ook een optie om een uniforme aanpak te realiseren.

3.3 HYDROLOGIE

Na het vaststellen hoe we met het zoutgehalte omgaan, is het zaak te begrijpen hoe zoet en zout water zich verspreiden in de Nederlandse wateren. Hierbij ligt de focus op het oppervlaktewater en het grondwater. In dit deelhoofdstuk staat de volgende vraag centraal: waar komt het zout vandaan en waar komt het terecht? Hierbij maken we onderscheid tussen wateraanvoergebieden en gebieden met natuurlijke wateren.

Om de centrale vraag te beantwoorden, wordt eerst stilgestaan bij de diverse bronnen van zout in Nederland (paragraaf 3.3.1). Daarna wordt de historische ontwikkeling van laag-Nederland beschreven (paragraaf 3.3.2), die een grote rol heeft gespeeld bij de verspreiding van zout (grond)water. Daarmee is de historische ontwikkeling dus erg relevant voor het vraagstuk over zoet-zout dynamiek. Hierna worden de processen beschreven die een rol spelen bij verzilting (paragrafen 3.3.3-3.3.4) en wordt een doorkijk gegeven naar toekomstige ontwikkelingen die relevant zijn voor het vraagstuk (paragraaf 3.3.5). In paragraaf 3.3.6 staan we stil bij verzoeting.

3.3.1 BRONNEN VAN ZOUT

Om te begrijpen waar het zout kan komen in laag-Nederland, is het eerst nodig te bepalen waar zout water vandaan komt. Hierbij is een onderscheid te maken tussen interne bronnen (bronnen in gebied zelf) en externe bronnen (bronnen buiten het gebied om), alsook een onderscheid tussen natuurlijke bronnen en kunstmatige bronnen van zout.

Een belangrijke interne bron van zout is zout grondwater. Zout grondwater kan zijn overgeërfd uit de ontstaansgeschiedenis van het gebied, bijvoorbeeld doordat het gebied vroeger overstroomd was door zeewater. Hierdoor is het zoete grondwater verdrongen en heeft dit plaats gemaakt voor zout grondwater. Daarnaast kan verzilting van grondwater optreden door overmatig oppompen van zoet grondwater, waardoor zout grondwater uit diepere lagen of vanuit de zee diep ondergronds naar het gebied stroomt. Dit probleem speelt onder meer bij het oppompen voor landbouwkundig gebruik van zoet water uit een aanwezige zoetwaterbel. Met name in diepe polders kan zout water door een hoge kweldruk leiden tot verzilting van het oppervlaktewater.

Een belangrijke externe bron van zout is het intreden van zout zeewater via de oppervlaktewateren (en het ondiepe grondwater). In Nederland zijn tal van verbindingen aanwezig tussen de rivieren en de zee. Zout water kan via de rivieren het land binnendringen. Dit hangt sterk samen met het getij (tijdens hoogwater kan zout water verder stroomopwaarts reiken dan tijdens laagwater). Deze indringing kan verder versterken in tijden van een lage rivierafvoer en landwaartse stormen. Ook kan er via schut- of spuisluisen zout water het zoete binnenland binnenkomen. Bij dijken is er daarnaast mogelijk sprake van piping waardoor percelen en waterlopen in het binnengebied sterk kunnen verbrakken. Klimaatverandering, met onder andere toenemende droogte en zeespiegelstijging, versterkt de invloed van zowel de interne bronnen (grondwater) als externe bronnen (zeewater) op het Nederlandse watersysteem.

Andere externe bronnen van zout zijn veelal kunstmatige bronnen zoals zoutrijk effluent van industrieën of de uitspoeling van zout na de-icing toepassingen op wegen en vliegtuigen. Deze bronnen hebben op de grote schaal van provincies of heel Nederland een veel kleinere invloed dan het historisch zoute grondwater en de indringing van zeewater. Op kleine schaal kan deze bron van zout echter wel gevolgen hebben voor de aquatische en terrestrische natuur.

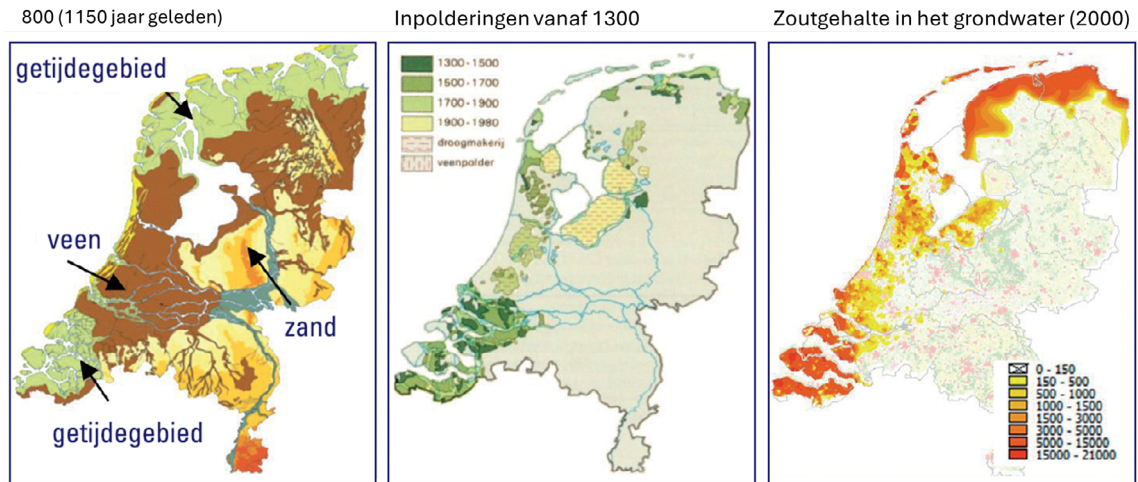
3.3.2 HISTORISCHE ONTWIKKELING

Een groot deel van de verzilting in Nederland is terug te herleiden uit de ontstaansgeschiedenis van het Nederlandse landschap. Tijdens de ontwikkeling van Nederland in het Holoceen (~11.700 jaar geleden tot nu) is zout grondwater in een groot gedeelte van Laag-Nederland in de ondergrond terechtgekomen door mariene invloed. De mate en manier van verzilting verschilt echter tussen de kustprovincies. Om de regionale verschillen te kunnen duiden, geven we eerst een kort overzicht van de landelijke trends in de ontstaansgeschiedenis van het Nederlandse landschap tijdens het Holoceen. Hierna volgt een korte en regionaal-specifieke beschrijving met historische ontwikkelingen die karakteristiek zijn voor deze regio's.

Let op: deze paragraaf geeft een kort overzicht van de Nederlandse ontstaansgeschiedenis tijdens het Holoceen die relevant is voor het vraagstuk over de zoet-zout dynamiek. Het is echter van belang er rekening mee te houden dat de vorming van het landschap geleid heeft tot grote ruimtelijke verschillen, ook op lokale schaal. Verder geldt dat zowel de landschappelijke ontwikkelingen als de hydrologische balans tussen zoet en zout niet statisch zijn over de tijd. Deze ontwikkelingen zijn hoog dynamisch en zullen in de toekomst effect hebben op de zoet-zout verdeling in het watersysteem (zie ook de toekomstscenario's in paragraaf 3.3.5) (Delsman *et al.* 2022). Voor een uitgebreidere en meer gedetailleerde analyse van de Nederlandse ontstaansgeschiedenis wordt de lezer verwezen naar onder andere Vos (2018), Stouthamer en anderen (2023) en Berendsen en Stouthamer (2000).

Verzilting wordt in deze rapportage vooral besproken voor de kustwaterschappen. Dit heeft als reden dat verzilting vooral een rol speelt in Laag-Nederland, door twee factoren in de vorming van het land: de kustontwikkeling sinds de laatste ijstijd, ook wel 'het Holoceen' (ongeveer 11.700 – 10.000 jaar geleden tot nu) en het proces van inpolderen (ontwatering, landaanwinning en droogmaking) sinds de middeleeuwen vanaf 1300 AD (afbeelding 3.1).

AFBEELDING 3.1 DE ONTSTAANSGESCHIEDENIS VAN NEDERLAND GEÏLLUSTREERD IN DRIE FIGUREN. (LINKS) NEDERLAND ONGEVEER 1.150 JAAR GELEDEN (RACM & TNO). (MIDDEN) DE FASERING VAN INPOLDERINGEN SINDS 1300 NA CHRISTUS. (ATLAS VAN NEDERLAND). (RECHTS) HET ZOUTGEHALTE (MG CL/L) TOT EEN DIEPTE VAN CA. 20 M IN HET JAAR 2000 NA CHRISTUS (TNO). (BRON: ACACIA WATER, LEVEN MET WATER & STOWA (2009))



Het voorkomen van zout water in de ondergrond van Laag-Nederland is grotendeels daar terecht gekomen tijdens het Holoceen. Het Holoceen is de laatste warme periode sinds de laatste ijstijd en begon met een opwarming van de aarde. De smelt van gletsjers die dit teweeg bracht, leidde tot het stijgen van de zeespiegel. Rond 7.500 jaar geleden begon de zee de regio's in Nederland te overspoelen die we nu kennen als de kustprovincies van Laag-Nederland. Tijdens het binnendringen van de zee ontstond er een omgeving vergelijkbaar met de huidige Waddenzee: een dynamische omgeving waarin het landschap steeds veranderde door getijdenstroming, rivierafvoer en het eroderen en opslibben van sediment. Door deze interactie tussen stroming en sediment konden er in dit waddenmilieu geulen, platen, kwelders en eilanden ontstaan (Rijkswaterstaat, 2024).

Rond 5.500 jaar geleden was de zeespiegelstijging sterk afgeremd en begon de kust zich door opslibbing van sediment langzaam te sluiten. Hierdoor nam het aantal open verbindingen met de zee sterk af en door de hoge zeespiegelstand rees ook de grondwaterspiegel in Nederland. Op veel plaatsen kwam hierdoor zoet grondwater boven het maaiveld uit en ontstond er landwaarts van de kustzone een zoet gebied met veelal stilstaand water. In dit zoete water weg van de invloed van rivieren floreerde primaire productie en ontstonden er uitgestrekte veengebieden (laag- en hoogveen). Deze veengroei vond met name plaats in de kustprovincies Noord- en Zuid-Holland, Zuid-Friesland, Zuid-Groningen, Zeeland, Noord-Groningen en Noord-Friesland stonden onder invloed van een grotere getijdeslag (dit is vandaag de dag nog steeds het geval) die de open verbindingen met de zee open wist te houden. Hierdoor bleven deze gebieden tot zeker 1.200 jaar geleden grotendeels waddenmilieus (afbeelding 3.1). Het zijn met name deze laatste gebieden waar nu op kleine diepte al zout grondwater met hoge chlorideconcentraties wordt aangetroffen (afbeelding 3.1). Daarnaast vindt er ook een (geringe) opwaartse beweging plaats van zout water uit diepere mariene afzettingen in deze regio's.

De overige gebieden met zout grondwater in de ondiepe ondergrond overlappen sterk met de gebieden die sinds 1300 zijn ingepolderd (afbeelding 3.1). Het inpolderen van grote gebieden in Nederland geschiedde sinds de komst van de mechanische bemaling met windmolens rond 1300 na Chr. Zoute en brakke wateren en veenaftgravingen in West-Nederland werden

drooggelegd ten behoeve van de waterveiligheid en economisch gewin. De inpoldering resulteerde in een complexe situatie van hoogteverschillen en beïnvloedde daarmee het grondwatersysteem. In relatief hoger gelegen polders vindt infiltratie van regenwater plaats. In lager gelegen polders vindt juist kwel plaats. Dit is water dat door drukverschil door de ondergrond omhoog stroomt en kan zowel zoet als zout water zijn. Deze lokale, sterke verschillen in wegzijging en kwel leidden ertoe dat het eerder vrijwel stilstaande zoute grondwater langzaam, maar grootschalig in beweging kwam. Het zoute water dat nu via kwel omhoog komt, komt voort uit zeewater dat vooral in de periode tussen 7.500 en 3.500 jaar geleden was geïnfiltrerd. Zoute kwel treft men aan in droogmakerijen zoals de Schermer, Beemster, Haarlemmermeer en Mijdrecht, maar ook in de droogleggingen van oude (binnen) zeeën ter hoogte van Flevoland en de Wieringermeerpolder (vergelijk midden en rechts in afbeelding 3.1).

Gedurende de gehele ontwikkeling van Nederland is er sprake van bodemdaling. Laag-Nederland ligt op de grens van het Noordzeebekken, waar miljoenen jaren aan deltaafzettingen langzaam wegzakt. Onder natuurlijke omstandigheden werden lage delen van Nederland steeds opgehoogd door rivierafzettingen. Dit compenseerde de bodemdaling en zorgde dat Laag-Nederland gemiddeld hoger lag dan de zeespiegel. Sinds de aanleg van dijken is deze compenserende werking verdwenen en zakt Laag-Nederland steeds verder weg. Het gevolg is dat kweldruk in Laag-Nederland daardoor langzaam toeneemt, met (verdere) verzilting tot gevolg.

FRIESLAND EN GRONINGEN

Friesland en Groningen vallen binnen de 'Regio IJsselmeergebied' en worden dus gevoed met zoetwater uit het IJsselmeer (Eindrapport Joint fact-finding robuustheid IJsselmeergebied bij droogte, 2021). Het zoete IJsselmeerwater wordt gebruikt om het peil te handhaven, de waterkwaliteit te beïnvloeden en de zoutconcentraties rond de door het waterschap gestelde norm te houden. Zonder inlaat van het zoete IJsselmeerwater zal het watersysteem verzilten. Oppervlakkige regenwaterlenzen, gevoed door infiltrerend regenwater en seizoensgebonden van aard, vormen een dynamisch systeem dat essentieel is voor de zoetwatervoorziening van vegetatie en landbouw in de kustzone, ook in gebieden met sterke kwel.

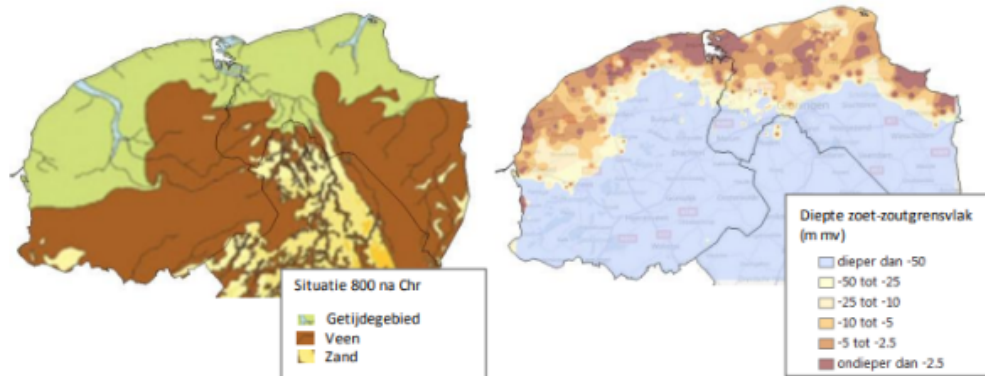
De ontwikkeling van Friesland en Groningen tijdens het Holoceen (de afgelopen ~11.700 jaar) lijkt sterk op de landelijke trend zoals hierboven besproken. Veengroei startte in deze provincies ongeveer 8.000 jaar geleden, toen de stijgende zeespiegel ervoor zorgde dat de grondwaterspiegel boven het maaiveld uitkwam en grote gedeelten onder water stonden met zoet water. Noordelijk van dit veengebied was er nog steeds sprake van een dynamisch waddenmilieu met geulen, platen en kwelders. Ongeveer 2.500 jaar geleden overspoelde de zee de veenmoerassen en werd er een zoute sliblaag gevormd.

Deze indringing van de zee leidde ook tot de vorming van diepe geulen die de zoute invloed verder het land in brachten. Dit was de periode dat het Lauwersmeergebied ontstond en de Hunze een monding naar het westen kreeg.

Vanaf ~1100 begon de inpoldering van brakke moerasgebieden. De huidige zoet-zoutverdeling in de ondergrond is nog altijd een weerspiegeling van de ontstaansgeschiedenis. De kustlijn uit de periode van 800 na Chr. komt overeen met de huidige zoet-zoutverdeling in de ondergrond (afbeelding 3.2). Opvallend is het meest oostelijke gebied in Groningen, het Dollardgebied. Rond 800 na Chr. stond dit gebied niet onder invloed van de zee, maar toch wordt hier nu brak tot zout grondwater aangetroffen. Dit wordt in verband gebracht met de

doorbraak van de oeverwal van de Eems (1287 en 1288). Na deze doorbraken vond er intensieve erosie plaats en ontstond de Dollard. Vanaf de 16^e eeuw is een groot gedeelte, maar niet het hele gebied van de Dollard ingepolderd (Velstra et al., 2011).

AFBEELDING 3.2 DE GEOMORFOLOGISCHE SITUATIE OMSTREKES 800 NA CHRISTUS (LINKS) EN DE DIEPTE VAN HET ZOETE GRONDWATER TEN OPZICHTE VAN HET MAAIVELD IN 2011 (RECHTS) (VELSTRA ET AL., 2011)



NOORD- EN ZUID-HOLLAND

West-Nederland wordt thans gevoed met zoet water vanuit de grote rivieren en met name de Hollandsche IJssel. Een groot deel van Noord-Noord-Holland wordt echter gevoed met zoet water uit het IJsselmeer en het Veluwemeer. Net als in Friesland en Groningen geldt hier dat het oppervlaktewater verzilt door kwel als er niet wordt doorgespoeld met zoet water van buiten de regio.

Het zoutgehalte van het grondwater in Noord- en Zuid-Holland weerspiegelt de ontstaansgeschiedenis van de regio, waarin overstromingen, landaanwinningen en inpolderingen een gevarieerd patroon van zoutgehalten hebben veroorzaakt. Na de vorming van de uitgestrekte veengebieden leidden nieuwe zee doorbraken rond 1000 na Chr. tot een toenemende invloed van zout in Noord- en Zuid-Holland. Vanaf de Middeleeuwen werd er grootschalig gewerkt aan de ontwatering en inpoldering van de ondergelopen gebieden.

Vanaf de 16e eeuw werden ook grote plassen drooggelegd die waren ontstaan door grootschalige veenwinning (voor turf). Deze drooggelegde gebieden staan nu bekend als droogmakerijen. Andere gebieden die zijn drooggelegd, zijn delen van de Zuiderzee drooggelegd, zoals de Wieringermeer, die in 1930 als laatste werd drooggelegd. De polders in voormalig zoute wateren verminderden de directe invloed van de zee, maar het zoute grondwater bleef in de (diepe) ondergrond aanwezig. De hoogteverschillen tussen diepe droogmakerijen en ondiepe veenpolders brachten na 1600 na Chr. nieuwe grondwaterstromen op gang (Delsman *et al.*, 2023). Zo kwam in de diepe droogmakerijen kwel van diep brak grondwater naar boven, terwijl in de ondiepe veenpolders de infiltratie van zoet water sterker werd. Sinds 1932, toen het IJsselmeer werd afgesloten, komt zoet water uit de veenpolders en het IJsselmeer nu als zoete kwel omhoog langs de randen van de polders (Velstra *et al.*, 2013).

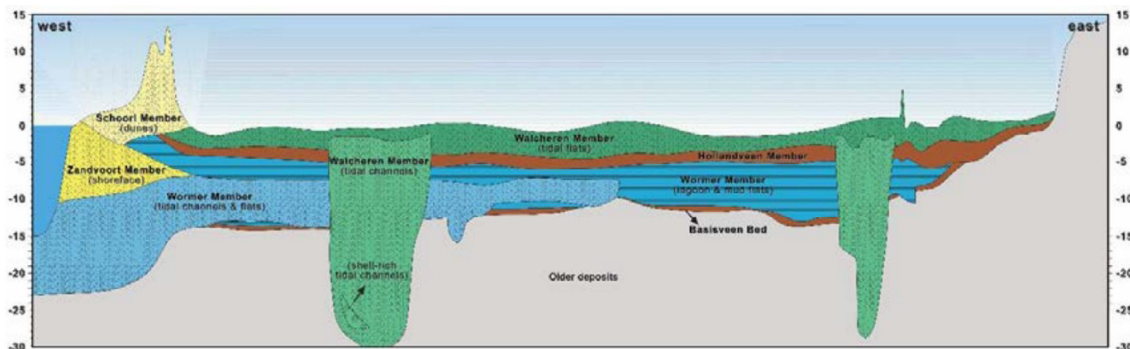
ZUIDWESTELIJKE DELTA

In de zuidwestelijke delta (Zeeland en Goeree-Overflakkee) ligt het maaiveld rondom Normaal Amsterdams Peil (NAP) en zijn hoogteverschillen gering. De oudste polders liggen door natuurlijke bodemdaling nu het laagst en de jongste polders liggen het hoogst. De hoogste natuurlijke delen in de Zuidwestelijke delta zijn de duinen (afbeelding 3.3) en de schor 'Het land van Saeftinghe'. De regio wordt gekenmerkt door de nabijheid van zout buitenwater en

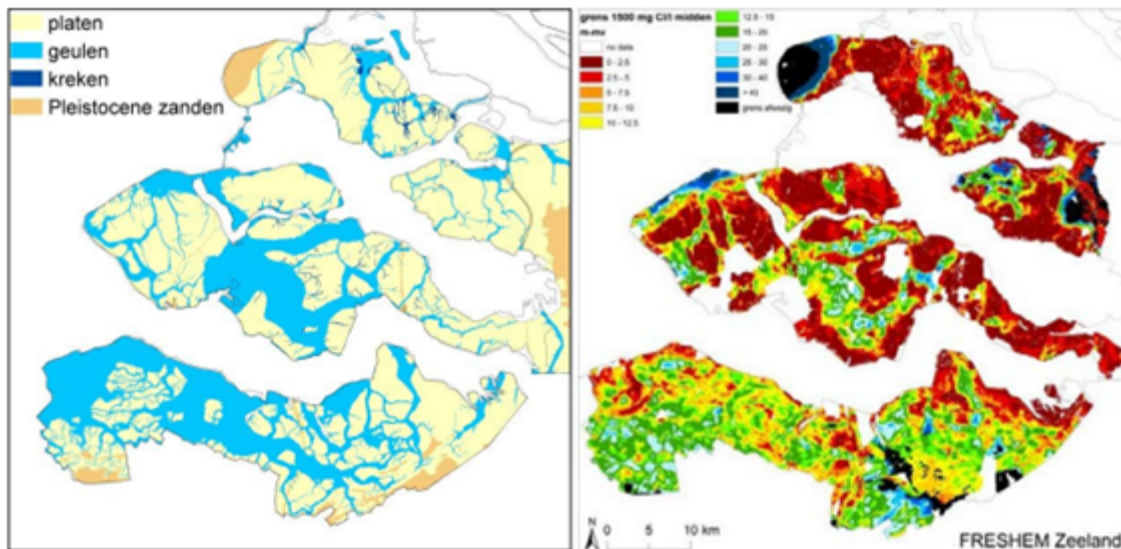
een ontstaansgeschiedenis met grote estuariene en mariene invloeden. Ook heeft de regio een rijke geschiedenis van historische landaanwinningsprojecten sinds de Middeleeuwen, vooral in de 17^e eeuw, toen ongeveer 50.000 ha extra land werd gecreëerd (Schultz, 1992; Van De Ven, 1993). Door de ontstaansgeschiedenis is het grondwater grotendeels brak tot zout, behalve in delen van Zeeuws-Vlaanderen, de Kop van Schouwen en oost-Tholen, waar een zoete grondwaterlaag aanwezig is en/of grondwaterstromingen van het vasteland voor verzoeting zorgen (Van Baaren *et al.*, 2018). Het stroomgebied van de Schelde bevat vijf typen grondwaterlichamen, waaronder duingebieden en diepe zandlagen (Regionaal Bestuurlijk Overleg Schelde, 2004).

In de Zuidwestelijke Delta is de aanvoer van extern zoet water beperkt, waardoor de regio kwetsbaar is voor droogte (Deltaprogramma; Deelprogramma Zuidwestelijke Delta, 2011). Zoet grondwater, dat zich voornamelijk in duinen en kreekkruggen bevindt (afbeelding 3.4), is de belangrijkste bron voor irrigatie. De beperkte beschikbaarheid van zoet grondwater en de afhankelijkheid van neerslag maken het gebied gevoelig voor droogte en zoutschade aan gewassen, vooral tijdens droge zomers (Klein Tank *et al.*, 2015; Oude Essink *et al.*, 2018). Toekomstige klimaatsveranderingen zullen naar verwachting de vraag naar zoet water doen toenemen en het aanbod doen afnemen, wat maatregelen vereist om de zoetwaterbeschikbaarheid te waarborgen (Stuyt *et al.*, 2016, 2011; Oude Essink and Pauw, 2018).

AFBEELDING 3.3 SCHEMATISCH GEOLOGISCH DWARSPROFIEL DOOR ZEELAND (BRON: REGIS, TNO GEOLOGISCHE DIENST NEDERLAND). ALLEEN DE HOLOCENE AFZETTINGEN ZIJN WEERGEGEVEN. DE ZOETWATERVOORRADEN BEVINDEN ZICH IN DE DUINEN, KREEKRUGGEN EN PLEISTOCENE DEKZANDRUGGEN (BRON: OUDE ESSINK *ET AL.*, 2018)



AFBEELDING 3.4 KARTERING VAN PLATEN, GEULEN, KREKEN EN PLEISTOCENE ZANDEN (LINKS) EN DE DIEPTE VAN DE ZOET-BRAK GRENS IN ZEELAND VOLGENS FRESHM (DELSMAN ET AL., 2018 EN VAN BAAREN ET AL., 2018)



3.3.3 INTERNE VERZILTING

De ontstaansgeschiedenis van Laag-Nederland geeft inzicht in waar het zoute water vroeger terecht is gekomen en het is nu de vraag hoe deze ontstaansgeschiedenis de huidige zoet-zout dynamiek in Laag- Nederland beïnvloedt. Om dit te achterhalen, gaan we in deze paragraaf in meer detail in op het proces van interne verzilting. Interne verzilting is het omhoogkomen (ook wel: kwel) van zout of brak water, waardoor het oppervlaktewater en ondiep grondwater verzilt. Hier speelt vooral de aan- of afwezigheid van zout grondwater een belangrijke rol in de mate van verzilting die kan optreden.

Interne verzilting is vooral relevant voor diepe polders, waar hoge kweldruk optreedt door de aanzienlijke hoogteverschillen. Omringende watersystemen ontvangen vervolgens ook verzilt water doordat het kwelwater uitgemalen moet worden. Overige vormen van (externe) verzilting worden beschreven in paragraaf 3.3.4.

GRONDWATERSTROMING EN ZOETWATERLENZEN

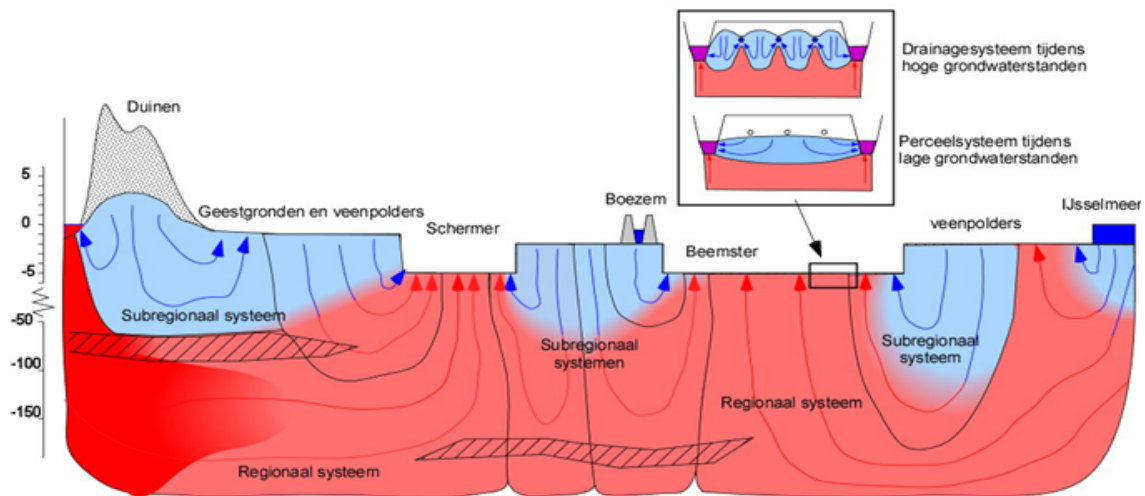
Lokale grondwaterstroming wordt beïnvloed door lokale hoogteverschillen en watergebruik, wat leidt tot een ruimtelijk patroon van locaties gedomineerd door kwel of door infiltratie (De Vries, 1995). Water stroomt langzaam van zones met infiltratie naar zones van kwel. Dit draagt vervolgens weer bij aan een verhoging of verlaging van de kans op verzilting. Door de aanleg van polders en beheerde waterpeilen zijn er op korte afstand grote verschillen ontstaan in zones van infiltratie en kwel. Hierdoor ontstaat als het ware een regionaal gebied met een eigen complexe grondwaterstroming (afbeelding 3.5) die sterk kan afwijken van de natuurlijke grondwaterstroming in de tijd van voor de polders. In die tijd was grondwaterstroming voornamelijk weg van de rivieren en richting de zee. Het kwelwater in de polders in Laag-Nederland is vaak gemineraliseerd of zelfs brak en stroomt gestaag uit in de watergangen, waar het via de bodem of de drainage terecht komt in of onder agrarische percelen.

De complexe grondwaterstroming van polders ligt bovenop de grondwaterstroming vanuit diepere aardlagen. Deze diepere zone wordt gevoed met grondwater uit verder weg gelegen gebieden (bijvoorbeeld de zee) (afbeelding 3.5). Door natuurlijke kwel en de afvoer van oppervlaktewater stroomt oud brak tot zouter water uit deze diepe aardlagen omhoog richting het

centrum van de polder. Het huidige reliëf in het landschap, bestaande uit de duinen, de veenontginningen en de inpolderingen (afbeelding 3.5) is pas een paar 100 tot ~800 jaar oud. Het grondwater is nog niet met dit stromingspatroon in evenwicht, en zoutgehalten hebben zich daarom nog niet geheel aangepast.

Dieperliggend zouter water stroomt langzaam naar de oppervlakte, waardoor verzilting van de polders de komende eeuwen blijft toenemen (autonome verzilting) (Oude Essink *et al.*, 2010; Delsman *et al.*, 2014, Acacia Water, 2011). Dit wordt nog eens versterkt door de natuurlijke bodemdaling van het Noordzeebekken en de inklinking van oude afzettingen.

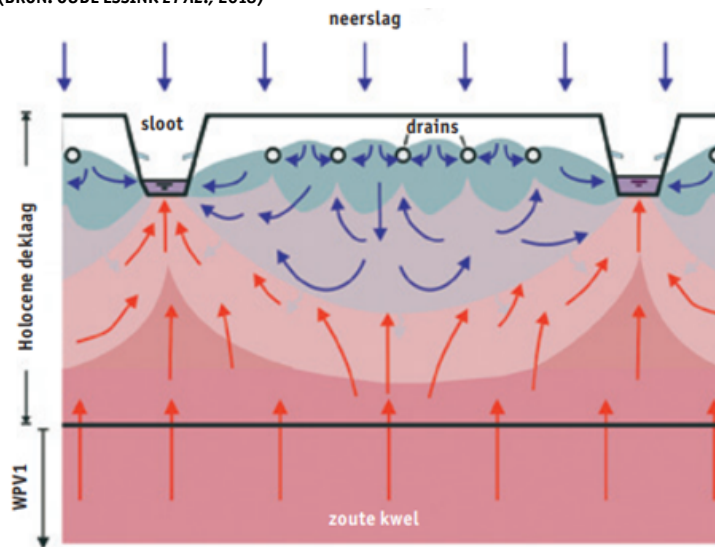
AFBEELDING 3.5 SCHEMATISCHE DWARSDOORSNEDE VAN GRONDWATERSTROMING TUSSEN EGMOND AAN ZEE (LINKS) EN OOSTHUIZEN (RECHTS). DE ZOETWATERLENZEN BIJ DE DUINEN, DE ONDIEPE VEENPOLDERS EN DE BOEZEMWATEREN (IN FIGUUR: SUB-REGIONAAL SYSTEEM) LIGGEN BOVENOP DE DIEPERE GRONDWATERSTROMINGEN (IN FIGUUR: REGIONAAL SYSTEEM) DIE GEVOED WORDEN MET HISTORISCH EN NIEUW ZOUT ZEEWATER (VELSTRA *ET AL.*, 2013; HHNK, 2014)



Naast de grondwaterstroming die op gang komt door hoogteverschillen van het land en waterpeilen, is er ook nog neerslag die een invloed uitoefent op verzilting. Neerslag vult vanaf het maaiveld naar beneden het grondwater aan met zoet water.

In gebieden met brak en zout grondwater ontstaat hierdoor een zoetwaterlens aan het oppervlak die als het ware drijft op het diepere zoutere grondwater (afbeelding 3.6). Deze lens vormt in feite de tijdelijke berging van de geïnfilterde neerslag op de percelen. Het stijghoogteverschil (en niet zozeer het dichtheidsverschil met zout grondwater) is de dominante factor die de grondwaterstroming beïnvloedt. Omdat de regenwaterlens afhankelijk is van de hoeveelheid neerslag, varieert een regenwaterlens over het jaar heen. In tijden van droogte kan zo'n regenwaterlens uitgeput raken, wat de kans op verzilting vergroot. In tijden van overdadige regen (en hogere grondwaterstanden) kunnen drains en greppels juist water afvoeren naar de watergangen.

AFBEELDING 3.6 SCHEMATISCHE DWARSDOORSNEDE VAN EEN REGENWATERLENS IN EEN GEBIED MET ZOUTE KWEL
(BRON: OUDE ESSINK *ET AL.*, 2018)



Verschillende onderzoekers hebben reeds onderzoek gedaan naar het gedrag van neerslaglenzen (Poot en Schot, 2000; Schot *et al.*, 2004; Van der Wal, 2001). Poot *et al.* (2004) vonden bijvoorbeeld dat er in laagveenpercelen zelfs bij een zeer grote kweldruk een regenlens kan ontstaan, tot een diepte van 1,1 m. Poot en Schot (2000) beschrijven de seizoen variatie in de dynamiek van neerslaglenzen in laagveengebieden. In de winter is de berekende neerslaglens het dikst, omdat er dan sprake is van een neerslagoverschot, in tegenstelling tot de zomer. Verder reageert de grondwaterstand sneller op veranderingen in het neerslagoverschot dan de diepte van het grensvlak tussen het neerslagwater en het diepe grondwater. Hierdoor daalt bij een groot neerslagtekort de freatische grondwaterstand, maar trekt de zoet-zoutgrens pas later omhoog, om op het einde van het groeiseizoen op zijn hoogst te zijn. Het lokale grondwaterstromingspatroon op percelen bepaalt daarbij de blootstelling van vegetatie aan brakke kwel. Kwel kan soms direct door de sloten wordt afgevangen zonder dat de vegetatie in contact is gekomen met het zoute kwelwater. Geïnfiltreerd regenwater is dan de belangrijkste bron van watervoorziening voor de vegetatie (Poot en Schot, 2000).

De Louw (2011, 2013) heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar het gedrag van ondiepe regenwaterlenzen op landbouwpercelen in Zeeland. Uit metingen en modelonderzoek blijkt dat de ligging van het grensvlak tussen kwelwater en regenwater wordt bepaald door de onderlinge verhouding van het langjarige neerslagoverschot, de hoeveelheid kwel en de ligging van de drainagemiddelen. Het grensvlak is eigenlijk meer een mengzone, waarin menging plaatsvindt door kortdurende variaties in neerslag, verdamping, kwel en drainage. In droge zomers kan het zoete water in de regenwaterlens op raken, waardoor brakker kwelwater theoretisch capillair kan opstijgen tot in de wortelzone (zie volgende paragraaf). De Louw (2013) observeerde daarbij dat het poriewater ook na optredende neerslag nog brak kan blijven, wanneer de neerslag via preferente stroming (bijvoorbeeld kleischeuren) snel tot in het grondwater infiltreert.

VERZILTING VAN DE WORTELZONE

Zout kan op verschillende manieren in de wortelzone terecht komen door interne verzilting. Het zout kan van onderaf komen (brakke kwel, capillaire opstijging en sub-irrigatie) of van boven (via irrigatie op de bodem of op de bladeren).

Bronnen van zout van onderen

Bij brakke kwel is er in de meeste gevallen sprake van een diffuse bron. Het water komt dan op meerdere punten naar boven en wordt meestal door de aanwezige drainage opgevangen en afgevoerd naar de sloot. Dit water komt dan dus niet in de wortelzone terecht. Als de kweldruk lokaal heel groot is, dan komt het wel eens voor dat de drainage dit niet genoeg kan afvoeren en er natte plekken in het veld ontstaan.

Dit treedt met name lokaal op (een relatief klein deel van een perceel). Deze natte plekken zijn verzadigd met water, waardoor er in de bodem nog nauwelijks lucht en zuurstof aanwezig is. Dit is echter wel essentieel voor de wortelgroei. Deze natte plekken zijn daarom vaak kale plekken waar geen gewasgroei of plantengroei plaatsvindt. Dit komt echter met name door de zuurstofloze omstandigheden en niet zozeer door het zout; ook onder zoete omstandigheden zullen zulke plekken kaal zijn.

Via capillaire opstijging van brak grondwater kan zout in de wortelzone terecht komen. In een kleibodem kan het grondwater veel verder optrekken dan in een zandbodem. Hoe zout een bodem wordt door capillaire opstijging in Nederland is echter niet bekend. Het is wel bekend dat verzilting van de wortelzone door capillaire opstijging een langzaam proces is. Dit proces treedt met name op in tijden van droogte, wanneer er in alle bodemlagen een gebrek aan zoet water is. Vooral in kleibodems kan verzilting van de wortelzone langdurige gevolgen hebben (zie sectie 3.2.2).

Een derde manier hoe zout van onderen de wortelzone kan bereiken is door middel van (sub)infiltratie. Infiltratie vanuit de sloot direct de bodem in zal van beperkte invloed zijn, maar sub infiltratie (waarbij slootwater via de drains het perceel intrekt en vervolgens via capillaire opstijging in de wortelzone terecht komt) heeft waarschijnlijk een groter effect op de bodemzoutconcentratie. Dit effect treedt dan alleen op als de drains onder het water-niveau van de sloot liggen en er geen afvoer van (grond)water plaatsvindt.

Bronnen van zout van boven

Als het water via beregening in de bodem terecht komt, dan dringt het water direct in de bovenste laag binnen. Hierbij is een verschil te maken tussen vormen van irrigatie direct op de bodem (bijvoorbeeld: druppelirrigatie) en direct op het blad (bijvoorbeeld: sprinklerirrigatie). In geval van irrigatie op het blad zal een gedeelte van de zouten op de planten/gewassen blijven en is er relatief iets minder opname van zout in de wortelzone in vergelijking met irrigatie direct op de bodem.

De zoutconcentratie in de wortelzone na beregening hangt af van de concentratie van het beregeningswater en de hoeveelheid (zoet) poriewater in de bodem. In droge jaren is de concentratie in de wortelzone vergelijkbaar met de concentratie in het beregeningswater. Er treedt dan namelijk weinig verdunning op met zoet bodemvocht en/of regenwater. In de meest gevoelige omstandigheid (namelijk: een zandige bodem⁴ + extreem droog jaar) kan het zoutgehalte in de wortelzone toenemen tot tweemaal het zoutgehalte van het beregeningswater (Stuyt *et al.*, 2013). In alle data tot en met het jaar 2000 is alleen in het extreem droge jaar van 1976 te zien dat de bodem zouter wordt dan het gietwater. Het is onbekend of dit ook geldt voor de droge zomers van de meer recente jaren.

4 Een zandige bodem heeft een beperkt waterbergend vermogen, waardoor er beperkte verdunning mogelijk is tussen het aanwezige water en het zout in het gietwater. Bodems met juist een hoog percentage klei en organische stof hebben een hoog vermogen om water in de bodem vast te houden, waardoor er meer/langer verdunning op kan treden bij gebruik van zout(er) gietwater. Hier staat tegenover dat een zandbodem juist wel weer gemakkelijker zout uitspoelt als het gietwater weer zoet is.

Berekening van verzilting van de wortelzone

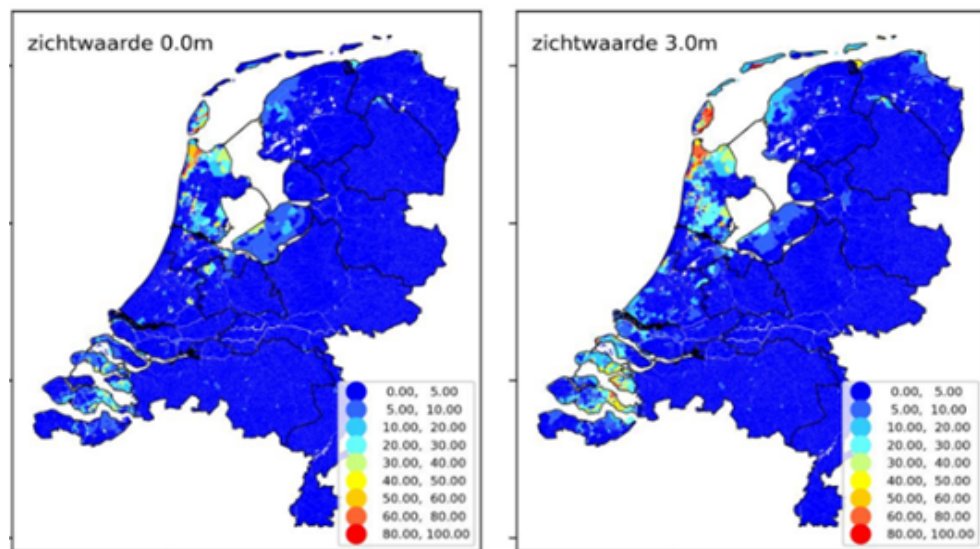
In het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) wordt de chlorideconcentratie van de wortelzone berekend door het model TRANSOL. Uit de validatie van het LHM komt wel naar voren dat de berekende verzilting van de wortelzone kleiner is dan de verzilting die agrariërs ervaren (Acacia Water *et al.*, 2021).

Verzilting van de wortelzone is een heterogeen proces, waarbij onder meer de ligging van kleischeuren en drainage een rol spelen. Verder geldt dat het weer (het risico op verzilting van de wortelzone neemt toe bij drogere zomers) en de ligging van drainage (wordt de zoute kwel wel of niet afgevoerd via de drainagebuizen) een minstens zo grote rol speelt als de kwelbelasting (De Louw *et al.*, 2011, 2013).

Om toch een beeld te krijgen waar in Nederland verzilting van de wortelzone speelt, zonder het weer en de ligging van drainage en kleischeuren mee te nemen, geeft afbeelding 3.7 aan waar in Nederland de wortelzone aan het eind van de zomer een chlorideconcentratie van meer dan 1.000 mg Cl/l. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen de huidige zeespiegel en een 3 meter hogere zeespiegelstand. Deze afbeelding geeft met percentages van landbouwoppervlak vooral kwalitatief aan waar bij toenemende zeespiegelstijging problemen met zout in de wortelzone kunnen gaan spelen.

Verzilting van de wortelzone speelt thans op de Waddeneilanden, de Zeeuwse eilanden, de kop van Noord- Holland, Groot-Mijdrecht en de Friese kustregio. Bij 3 meter zeespiegelstijging neemt de verzilting toe, met name op de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden, de Waddeneilanden en in de kop van Noord- Holland.

AFBEELDING 3.7 BEREKEND PERCENTAGE VAN HET LANDBOUWOPPERVLAK PER REGIONAAL GEGROEPEERD OPPERVLAKTEWATERLICHAAM MET EEN CHLORIDEGEHALTE IN DE WORTELZONE HOGER DAN 1000 MG CL/L (D.D. 20-08-2003). (LINKS) ZEESPIEGEL IN 2003. (RECHTS) INDICATIEVE SITUATIE BIJ 3 METER ZEESPIEGELSTIJGING (BRON: DELSMAN *ET AL.*, 2022)

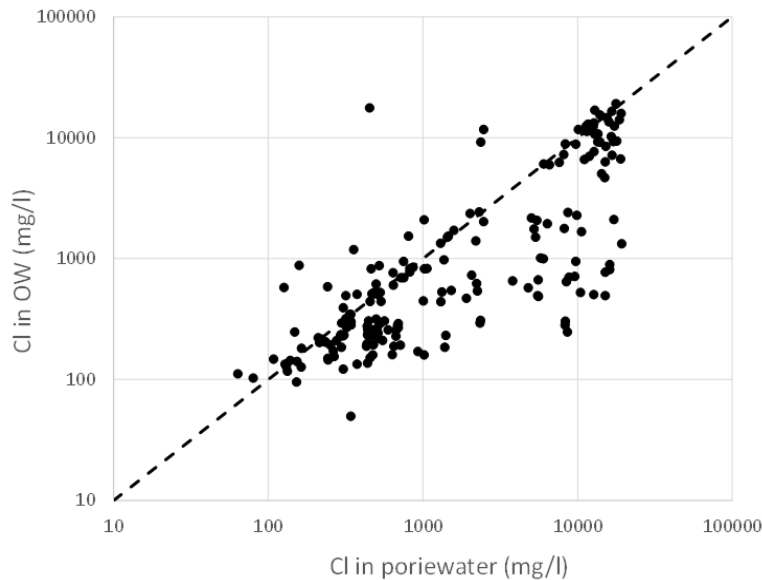


WATERBODEM VERSUS OPPERVLAKTEWATER

Er is soms sprake van een verschil in zoutgehalte tussen het oppervlaktewater en de waterbodem. In veel brakke binnenwateren in Nederland is het zoutgehalte in de waterbodem 1.000 tot 15.000 mg Cl/l hoger dan in het bovenstaande oppervlaktewater (afbeelding 3.8). Deze verschillen zijn vaak het gevolg van brakke kwel (waardoor de waterbodem brak blijft) in combinatie met de inlaat van gebiedsvreemd zoet water (waardoor het oppervlaktewater

redelijk zoet blijft). Hierbij geldt dat waterbodems sneller brak worden dan dat ze verzoeten, waardoor ze dus nog lange tijd (ten minste meerdere jaren tot decennia) hun brakke karakter behouden, ook als het oppervlaktewater is verzoet (Van Dijk *et al.*, 2015).

AFBEELDING 3.8 DE CHLORIDECONCENTRATIES IN HET OPPERVLAKTewater EN PORIEVOCHT VAN VERSCHILLENDE BRASSE WATEREN IN NEDERLAND. DE X-AS GEEFT DE CHLORIDE-CONCENTRATIE IN HET PORIEVOCHT VAN DE WATERBODEM WEER, EN DE Y-AS DE CORRESPONDERENDE CONCENTRATIE IN HET OPPERVLAKTewater. DE STIPPELLIJN GEEFT DE 1:1 LIJN TUSSEN OPPERVLAKTewater EN PORIEVOCHT WEER. N.B. BEIDE ASSEN BEZITTEN EEN LOGARITMISCHE SCHAAL. GEGEVENS AFKOMSTIG VAN VAN DIJK *ET AL.* (2022)



3.3.4 EXTERNE VERZILTING

Externe verzilting is het binnendringen van ‘uitheems’ zout water via het oppervlaktewater, voornamelijk afkomstig uit zeewater. Een belangrijke route hiervoor is zoutindringing via rivieren, vooral tijdens perioden van lage afvoer en/of stormopzet. Andere routes van zoutindringing zijn door kunstwerken zoals schut- of spuisluisen die in verbinding staan met zout buitenwater. Kleinschalige verzilting door bijvoorbeeld de-icing kunnen lokaal significante effecten opleveren, maar hier wordt alleen ingegaan op de grootschalige processen op regionaal en landelijk niveau.

ZOUTINDRINGING VIA RIVIEREN

Via de open riviermondingen dringt zout zeewater binnen onder invloed van verschillen in dichtheid en waterpeil. Door het dichtheidsverschil kan zout over de bodem van rivieren ver het land indringen. Dit proces wordt versterkt door het uitbaggeren en verdiepen van de grote rivieren. Deze inwaartse druk neemt toe als het waterpeil op zee toeneemt. Dit gebeurt dagelijks door het getij, maar wordt ook beïnvloed door windopzet (bijvoorbeeld tijdens aanlandige stormen) en rivierafvoer (een lagere rivierafvoer maakt het makkelijker voor zout water om verder binnen te dringen) (Friocourt *et al.* 2014, 2020). Concrete voorbeeld voor Nederland waar indringing via de rivieren plaatsvindt, zijn als volgt. In de Rijn-Maasmonding kan zout bij lage afvoeren via de Nieuwe Waterweg doordringen tot voorbij de Nieuwe en Oude Maas, tot in de Hollandsche IJssel en de Lek. In het Haringvliet terechtgekomen zout stroomt langzaam via het Spui weer terug, wat kan leiden tot langdurige verzilting van het inlaatpunt van het Brielse meer. Dit leidt tot problemen voor inlaatpunten voor het regionale watersysteem en de drinkwaterwinning.

In afgesloten open wateren, zoals het IJsselmeer of kanalen, kan zout via kwel en via kunstwerken (bijvoorbeeld: schutsluizen) binnendringen. Hoogteverschillen in de waterbodems bemoeilijken het beheersen van verzilting, omdat zout zich verzamelt in de diepere delen. Van daaruit kan het zout zich langzaam over het waterlichaam verspreiden en langdurig voor problemen zorgen. Doorspoeling is nodig om verzilting tegen te gaan, maar in droge tijden is er niet altijd genoeg water voorhanden.

Wanneer regionale inlaatpunten verzilt raken, wordt in veel gevallen de inname van water gestopt. Hierdoor zorgt externe verzilting indirect voor een zoetwatertekortsituatie in regionale watersystemen.

Dit kan weer leiden tot een vergroting van interne verzilting in het regionale systeem, als de doorspoeling van watersystemen in watertekortsituaties wordt verminderd of zelfs gestopt. Waterbeheerders onderzoeken momenteel of het inlaten van brakker water te verkiezen is boven het stopzetten van de inlaat om interne verzilting te voorkomen (Deltaplan Zoetwater 2022 – 2027, 2021, I&W).

INPOLDERING

Inpoldering heeft met name plaatsgevonden in gebieden die vatbaar zijn voor bodemdaling. Omdat inpoldering de natuurlijke ophoging van het land onmogelijk maakt, komen polders steeds lager te liggen. Hierdoor neemt de externe druk vanuit de zee toe. In Flevoland hebben ze dit principe meegenomen in het ontwerp van de polders. Door de aanleg van een zoet ringmeer rondom de polder, is de polder beter beschermd tegen verzilting. Ook wordt de oostzijde van de Flevopolders gevoed met zoet grondwater dat z'n oorsprong vindt in de Veluwe. Desondanks neemt de zoutvrucht aan de westrand van de Flevopolders langzaam toe door het opwellen van oud Zuiderzeewater (Delsman *et al.*, 2022). In oude polders in bijvoorbeeld Zeeland is hiervan geen sprake en neemt de kweldruk vanuit zee toe.

Er zijn ook situaties die juist een netto verzoeting laten zien, zoals aan de oostrand van de Wieringermeer. Sinds de inpoldering stroomt zoet IJsselmeerwater via het grondwater naar de Wieringermeer, waardoor de kwel aan de oostrand steeds verder verzoet. Andere gebieden waar de zoutvrucht afneemt, zijn onder andere de veenpolders in het Noorderkwartier.

DOORSPOELING

Verschillende regionale systemen worden met name in Q2 en Q3 doorgespoeld om het peil te handhaven, aan de waterkwaliteitsnormen te voldoen en om verziltingsproblemen te voorkomen. De watervraag voor doorspoeling om verzilting tegen te gaan maakt gemiddeld een derde uit van de totale watervraag van het regionale systeem. Dit verschilt wel sterk tussen verschillende waterbeheerders. Ook verschilt de streefchloridewaarde tussen verschillende waterbeheerders en watersystemen (Stuyt *et al.*, 2011). Zowel boezemkanalen als polders worden doorgespoeld. Doorspoeling vindt veelal alleen in het groeiseizoen plaats, waardoor doorgespoelde systemen vaak een onnatuurlijk verloop van de chlorideconcentratie kennen: de zoutconcentratie ligt 's winters hoger dan in de zomer. Doorspoelhoeveelheden en de mate van verspreiding van doorspoelwater zijn binnen een watersysteem vaak slecht bekend (Delsman *et al.*, 2011, 2018). In de beheerdersrapportage is meer informatie te vinden over de verschillen in beheer tussen waterschappen.

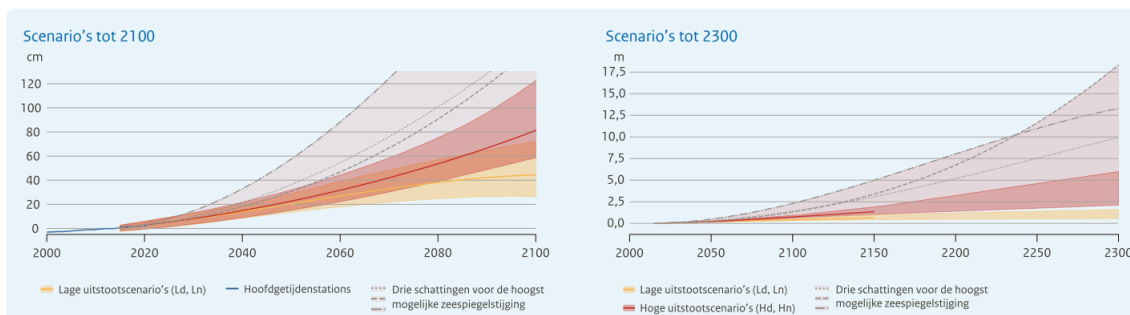
3.3.5 TOEKOMSTSCENARIO'S

Ten gevolge van klimaatverandering en geologische processen zijn er op de volgende vlakken ontwikkelingen die een invloed hebben op verzilting van het grond- en oppervlaktewater: zeespiegelstijging, bodemdaling, neerslag en verdamping. Zeespiegelstijging verhoogt de druk van zout zeewater richting het bodem dalende Laag-Nederland, wat zal leiden tot een sterkere kwel en een toename van verzilting. Veranderingen in het weerbeeld beïnvloeden de hoeveelheid neerslag en verdamping gedurende het jaar en beïnvloeden daardoor de mate van grondwateraanvulling, watervraag en uiteindelijk verzilting. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de invloed van zeespiegelstijging en bodemdaling op de toekomstige verziltingssituatie in Nederland. Het veranderende weerbeeld en de relatie hiervan met verzilting zijn nog onderhevig aan onzekerheden waardoor deze in de hier gepresenteerde en geciteerde studie (Delsman *et al.* (2022)) niet zijn meegenomen.

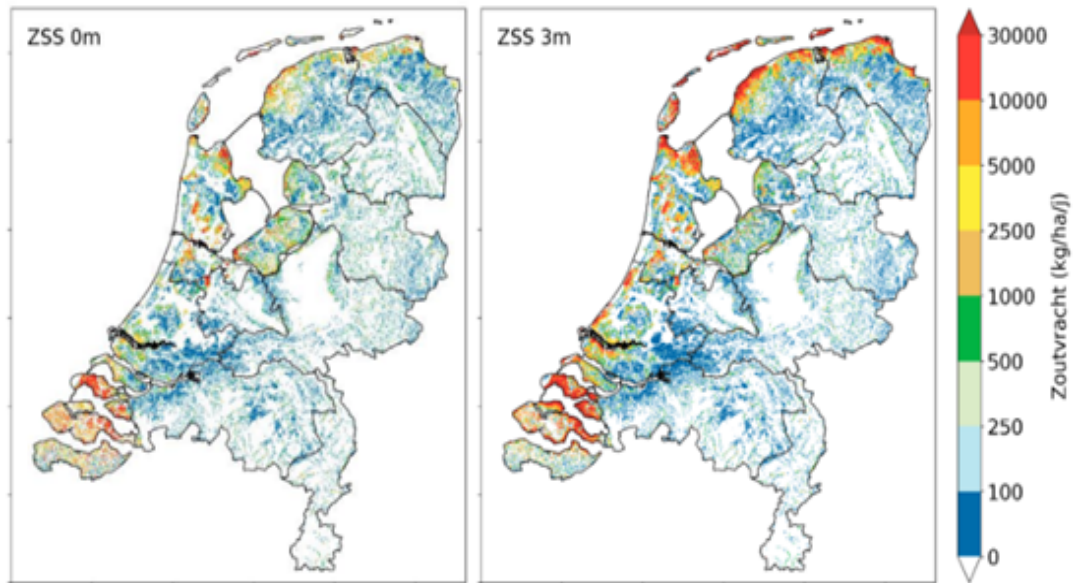
ZEESPIEGELSTIJGING

Delsman *et al.* (2022) berekenden de invloed van een zeespiegelstijging tot 3 meter op de verzilting van het grondwater in het Nederlandse kustgebied (afbeelding 3.9, afbeelding 3.10). Daarnaast brachten ze de benodigde veranderingen in doorspoelbehoefte in beeld, die voortvloeien uit de veranderde zoutvracht naar het oppervlaktewater. Zeespiegelstijging zorgt voor een toename in de stijghoogte tot zo'n 10 km uit de kust, afhankelijk van de geohydrologische omstandigheden. In dit invloedsgebied neemt bij 3 meter zeespiegelstijging de zoutvracht vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater toe met meer dan 250 %. Hier komt bij dat een verhoogde zeespiegel en een verlaagde rivierafvoer leidt tot het verder landinwaarts intrekken van zouttongen. Al bij een gemiddelde rivierafvoer zagen Haasnoot *et al.*, 2018 in hun verkennende berekeningen voor de Rijn-Maasmonding dat er een lineaire toename van zoutindringing is in relatie tot de zeespiegelstijging. Omdat de Zeeuwse delta reeds veelal uit zoute buitenwateren bestaat, worden daar geen grote veranderingen in de zoutconcentratie van open wateren verwacht (pers. comm.: Arno Nolte, Thijs van Kessel, Deltares). Wel zullen problemen met verzilting via het grondwater door zeespiegelstijging een toenemende rol gaan spelen.

AFBEELDING 3.9 VERWACHTE ZEESPIEGELSTIJGING IN NEDERLAND VOLGENS KNMI' 24

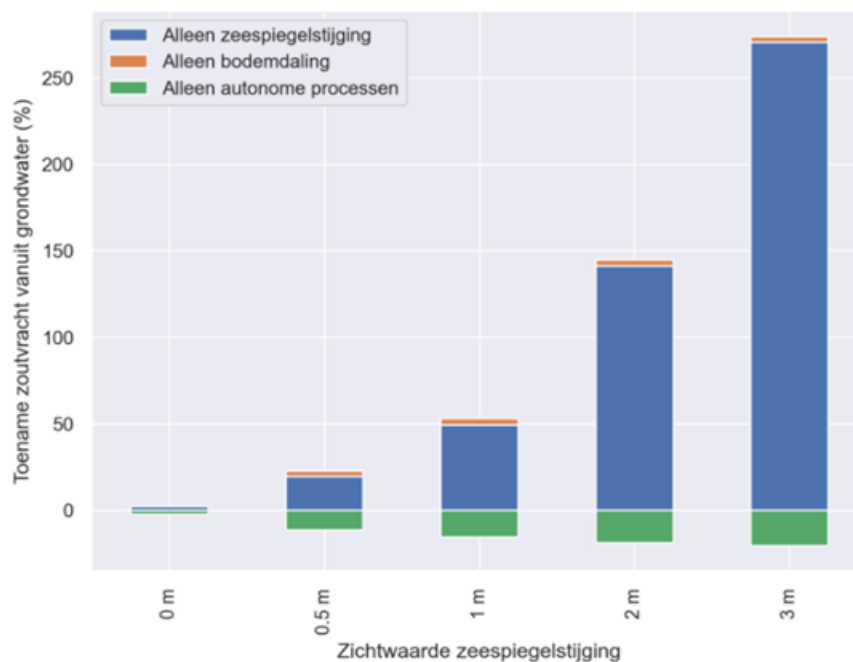


AFBEELDING 3.10 ZOUTVRACHT NAAR HET OPPERVLAKTWATER (KG/HA/JR) VOOR DE HUIDIGE SITUATIE (LINKS) EN VOOR EEN TOEKOMSTIGE SITUATIE MET 3 M ZEESPIEGELSTIJGING (ZSS) (RECHTS). (BRON: DELSMAN ET AL., 2022)



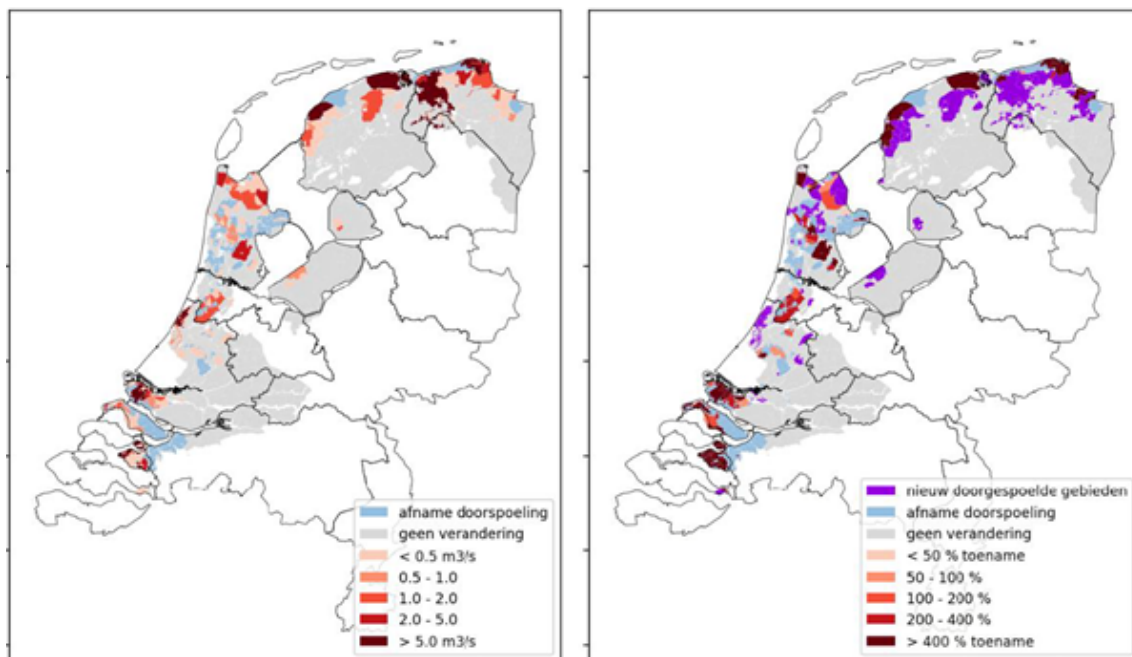
Naast zeespiegelstijging treden veranderingen in zoutvracht ook op door autonome processen en bodemdaling. In afbeelding 3.11 is de bijdrage van zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome processen uitgesplitst. Bij 3 meter zeespiegelstijging is de bijdrage van zeespiegelstijging dominant voor de toename van de zoutvracht. Het gebied waar de zoutvracht toeneemt door zeespiegelstijging, is kleiner dan de invloedssfeer van zeespiegelstijging. Dit komt doordat niet in het hele invloedssfeer-gebied sprake is van een kwelsituatie, ook niet op den duur. Bij een infiltratiesituatie is immers geen sprake van zoutvracht. Daarbij is er ook niet in het hele invloedssfeer-gebied sprake van brak grondwater. In de gebieden langs de grote rivieren neemt de kwel bijvoorbeeld wel toe, maar is het grondwater zoet.

AFBEELDING 3.11 VERANDERINGEN IN DE TOTALE ZOUTVRACHT OVER NEDERLAND TEN OPZICHTE VAN DE HUIDIGE SITUATIE (MTON/JR) PER ZICHTWAARDE VAN DE ZEESPIEGELSTIJGING, UITGESPLITST NAAR DE AFZONDERLIJKE BIJDRAGEN VAN ZEESPIEGELSTIJGING, BODEMDALING EN AUTONOME PROCESSEN



Delsman *et al.* (2022) hebben op basis van de berekende verandering in zoutvracht de toekomstige doorspoelbehoefte uitgerekend wanneer sloten net zo zoet worden gehouden als in de huidige situatie. afbeelding 3.12 geeft de veranderde doorspoelwatervraag weer bij 3 meter zeespiegelstijging ten opzichte van de huidige situatie. In het algemeen neemt de doorspoelwatervraag toe en wordt ook in nieuwe gebieden doorspoeling noodzakelijk om huidige chlorideconcentraties in het oppervlaktewater te handhaven. In sommige gebieden is een afname van de doorspoelwatervraag te zien, die vaak te relateren is aan een autonome afname van de zoutvracht. Dit is onder meer het geval voor de veenpolders in Noord-Holland en de West-Noord-Brabantse polders. De totale doorspoelwatervraag in polders neemt toe van 20 m³/s in de huidige situatie, tot ongeveer 50, 90 en 270 m³/s voor respectievelijke zeespiegelstijgingen van 0.5 meter, 1 meter en 3 meter (Delsman *et al.*, 2022).

AFBEELDING 3.12 VERANDERINGEN IN DE BEREKENDE DOORSPOELWATERVRAAG VAN DE POLDERGEBIEDEN VOOR EEN ZICHTWAARDE VAN 3 M ZEESPIEGELSTIJGING IN ABSOLUTE WAARDE (M³/S) (LINKS) EN PROCENTUELE VERANDERINGEN (%) (RECHTS). IN DE WITTE GEBIEDEN WORDT GEEN POLDERDOORSPOELING GETOOND. (BRON: DELSMAN *ET AL.*, 2022)



BODEMDALING

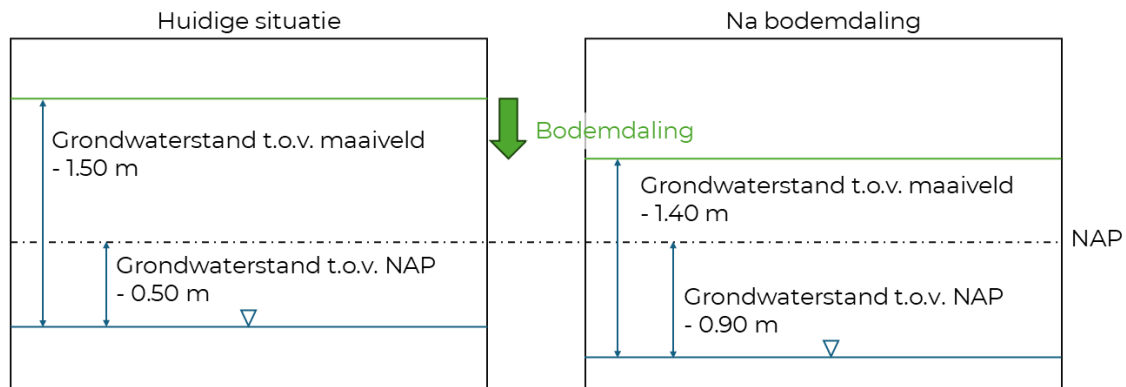
Bodemdaling in Nederland is te wijten aan geologische bodemdaling van het Noordzebekken (heel traag) en aan processen in de ondiepe aardlagen, zoals de oxidatie van droogvallend veen en de inklinking van droogvallende klei. Bodemdaling van de ondiepe aardlagen is daarom vooral afhankelijk van beheerkeuzes: als de stijghoogtes⁵ mee naar beneden worden geïndexeerd, vindt bodemdaling nog altijd plaats. Bodemdaling beïnvloedt vervolgens verzilting door een toenemend drukverschil tussen de zeespiegel en het lagere grondwaterpeil, waardoor zoute kwel via de ondergrond toeneemt.

Bodemdaling leidt in een groot deel van Laag-Nederland tot een daling van de stijghoogte van 10 tot meer dan 50 cm. Wanneer het oppervlaktewaterpeil niet langer geïndexeerd wordt, stopt ook de (invloed van) bodemdaling. De stijghoogte langs de kust blijft echter wel

5 In plaats van grondwaterpeilen wordt hier gesproken over 'stijghoogte', wat zoveel betekent als 'het potentiële peil van het wateroppervlak van grondwater, gemeten vanaf een bepaald niveau, bijvoorbeeld NAP'. Dit is de potentiële grondwaterstand wanneer men een put zou slaan. Dit is van belang, omdat de stijghoogte in dieper gelegen lagen samen met de stijghoogte in de meest oppervlakkige bodemlaag bepaalt in welke mate er kwel of infiltratie plaatsvindt.

nog steeds toenemen door zeespiegelstijging. Het effect van zeespiegelstijging op het meest oppervlakkige grondwater is op grotere afstand van de kust snel uitgewerkt. Een uitzondering hierop zijn de duingebieden, waar de grondwaterstand zich vrijer kan instellen dan in het sterk gereguleerde, ontwaterde binnenlandse gebied. De invloed van bodemdaling op de freatische grondwaterstanden is wel sterk, sterker dan in het dieper gelegen eerste watervoerende pakket. In het eerste watervoerende pakket dalen stijghoogtes daarom door bodemdaling in absolute zin (t.o.v. NAP), terwijl ze in relatieve zin (t.o.v. maaiveld) juist stijgen. Dit is geïllustreerd in afbeelding 3.13. In het tweede watervoerende pakket is de invloed van bodemdaling nog minder zichtbaar dan in het eerste watervoerende pakket.

AFBEELDING 3.13 INVLOED VAN BODEMDALING OP DE DALING VAN DE ABSOLUTE GRONDWATERSTAND (TEN OPZICHTE VAN NAP) EN STIJGING VAN DE RELATIEVE GRONDWATERSTAND (TEN OPZICHTE VAN MAAIVELD)



De invloed blijkt zich in het eerste watervoerende pakket te beperken tot zo'n 10 km van de kustlijn (en vanaf meestijgende rivieren). Deze zogeheten invloedssfeer varieert door Nederland, afhankelijk van geohydrologische kenmerken (Oude Essink, 2008). Hoe hoger de bovenliggende afsluitende weerstand, en hoe hoger de doorlatendheid van het watervoerende pakket, hoe verder landinwaarts de druk in het watervoerende pakket zal toenemen.

Waar in Zeeland de invloedssfeer bijvoorbeeld beperkt is door een dun watervoerend pakket, is het effect van zeespiegelstijging in Noord- en Zuid-Holland, en met name ook in Friesland verder landinwaarts merkbaar. De invloedssfeer reikt zeker in Friesland in diepere pakketten verder landinwaarts dan in ondiepere pakketten (Delsman *et al.*, 2022).

Het effect van bodemdaling op zoutvrucht is in veel gebieden relatief beperkt. Bodemdaling leidt in de diepe polders over het algemeen tot een afname van de zoutvrucht, omdat de veenpolders die buiten de diepe polders liggen sneller dalen dan de diepe polder zelf, waardoor de kweldruk afneemt. In de veenweidegebieden in Utrecht, Holland, Friesland en Overijssel heeft bodemdaling maar beperkt invloed op de zoutvrucht, aangezien het hier veelal zoete gebieden betreft. In Zuid-Flevoland en Zeeland treden grotere verschillen op door bodemdaling door de aanwezigheid van ondiep brak grondwater in deze gebieden.

AUTONOME VERANDERINGEN

Autonome processen omvatten het 'naijl-effect', de nog voortgaande aanpassing van het zoet-zoute grondwater aan veranderende omstandigheden in het verleden. De zoet-zout verdeling in het grondwater is op veel plaatsen nog niet in evenwicht met de geldende condities. Dit speelt met name in de diepe polders, waar hierdoor de komende eeuwen steeds dieper, zouter grondwater wordt aangetrokken. De zoutlast van deze polders neemt hierdoor, los

van andere ontwikkelingen zoals zeespiegelstijging, toe. Voor de Haarlemmermeer betreft dit bijvoorbeeld een toename van 20 % in 2050 ten opzichte van 2000 (Oude Essink *et al.*, 2008).

3.3.6 VERZOETING

Naast verzilting treedt op verschillende plaatsen ook verzoeting op. Net als bij verzilting treedt verzoeting op plekken op waar het de grondwaterstroming nog niet in evenwicht is met de huidige geldende situatie. Het verschil met verzilting is dat er in het geval van verzoeting steeds meer zoet water wordt aangevoerd. Zoals ook beschreven in paragraaf 3.3.5, zijn er verschillende gebieden waar door autonome processen verzoeting optreedt. Aan de oostrand van de Wieringermeer stroomt sinds de inpoldering geïnfilterd zoet IJsselmeer water naar de Wieringermeer, waardoor de kwel aan de oostrand steeds verder verzoet. Ook in de veenpolders in het Noorderkwartier neemt de zoutvracht af door autonome processen. In de Flevopolders is in de oostelijke helft verzoeting te zien, waar de toestroom vanuit de Veluwe de kwel verzoet.

Ook aan de randen van brakke kwelpolders zoals de Middelburg-Tempelpolder treedt verzoeting op (Delsman *et al.*, 2022). Zolang het waterschap zoete normeringen aanhoudt voor het oppervlaktewater, en hier ook op stuurt, betekent verzoeting dat er in theorie minder gebiedsvreemd water ingelaten hoeft te worden, afhankelijk van de locatie van de verzoeting. Extra zoet water kan echter ook tot uitdagingen leiden. Een voorbeeld hiervan is dat er in zoute natuurgebieden die dicht tegen de duinen aanliggen, meer zoet kwelwater omhoogkomt in zeer natte jaren. Het is nog onduidelijk hoe groot het fenomeen van verzoeting is, of dit tot grote problemen leidt, en hoe snel verzoeting verloopt.

3.4 BIOGEOCHEMIE

De hydrologische processen zoals hierboven beschreven werken door op de biogeochemie. Hierbij gaan we eerst in op de veranderingen ten aanzien van de chemische samenstelling en nutriënten in het water en de (water)bodem (paragraaf 3.4.1). Vervolgens beschrijven we hoe de ontstaansgeschiedenis een invloed uitoefent op de biogeochemie (paragraaf 3.4.2), om te eindigen met sulfaat- en ammoniumvergiftiging die vaak gepaard gaan met verzilting (paragraaf 3.4.3).

3.4.1 INVLOED OP CHEMISCHE SAMENSTELLING EN NUTRIËNTEN

Naast de hogere concentraties van natrium en chloride, verschilt de chemische samenstelling van brak en zout water ook op andere punten van zoet water. In brak en zout water komen namelijk naast natrium en chloride ook veel andere elementen in hogere concentraties voor dan in zoet water, zoals sulfaat, magnesium, calcium en kalium. Al deze elementen tezamen beïnvloeden de biogeochemische processen in het water en de waterbodem, waaronder ook ecologisch belangrijke processen zoals nutriëntencycli en de beschikbaarheid van toxische stoffen.

De effecten van een veranderend zoutgehalte op nutriëntenconcentraties in het oppervlaktewater kunnen niet los gezien worden van processen in de waterbodem. Chemische en fysische processen in de (water)bodem beïnvloeden het ecosysteem, met name in wateren waar zoutconcentraties door de tijd variëren (Herbert *et al.*, 2015). In welke mate processen in de waterbodem de samenstelling van het oppervlaktewater en de ecologie beïnvloeden hangt uiteraard in grote mate af van eigenschappen van het systeem zoals de hydrologie, verblijftijd,

bodemsamenstelling en dergelijke. In oppervlaktewateren met een lange verblijftijd is de invloed van processen in de waterbodem groter dan voor oppervlaktewateren met een korte verblijftijd.

Veranderende zoutconcentraties leiden tot veranderende concentraties van ionen waardoor fysische en chemische in oppervlaktewater en bodem beïnvloed worden. Zo kunnen stijgende zoutconcentraties leiden tot:

- mobilisatie ofwel immobilisatie van aan het bodemadsorptiecomplex gebonden kationen (bijvoorbeeld: ammonium of calcium) (Seitzinger *et al.*, 1991);
- flocculatie van zwevende deeltjes in de waterkolom ofwel bodemdeeltjes in de waterbodem met mogelijke consequenties voor het doorzicht in het water (flocculatie en bezinking) en hydrologische processen in de (water-)bodem (effecten op bodemporiëegrootheid en hydrologie) (onder andere Hoag & Price, 1997, Van Dijk *et al.*, 2017).

Daarnaast kunnen veranderende zoutconcentraties allerlei (biogeo)chemische reacties beïnvloeden, waaronder redoxreacties. De combinatie van veranderende zoutconcentraties op fysische en chemische processen kunnen ook de nutriëntencycli en mate van (interne) eutrofiëring beïnvloeden. Omdat de beschikbaarheid van nutriënten een grote invloed heeft op het functioneren van ecosystemen, worden de effecten van een veranderend zoutgehalte op de beschikbaarheid van nutriënten hier in meer detail behandeld. De effecten van veranderende zoutconcentraties op stikstof en fosfor zullen hier kort samengevat besproken worden.

De mate waarin aan zout gerelateerde stoffen de nutriëntencycli en nutriëntenbeschikbaarheid beïnvloeden hangt onder andere af van het sediment type en samenstelling (veen, klei, zand, organisch stof gehalte et cetera) en de redoxtoestand (zuurstofarm of zuurstofrijk) (afbeelding 3.14 in Kader 3.1). Hierdoor is de chemische samenstelling van brak water van allerlei omgevingsfactoren afhankelijk en daarom locatie-specifiek.

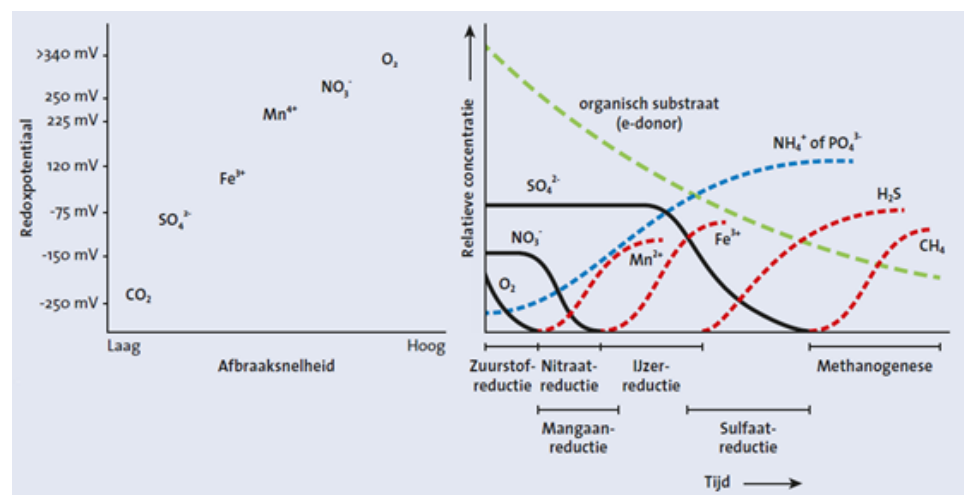
KADER 3.1 REDOXPROCESSEN

Veel biogeochemische reacties in het oppervlaktewater en de waterbodem verlopen via zogeheten redoxreacties. De term 'redox' is een samenstelling van de begrippen 'reductie' en 'oxidatie'. Redoxreacties zijn reacties waarbij elektronen worden uitgewisseld en deze reacties spelen een belangrijke rol in de waterbodem. Tijdens redoxreacties, bijvoorbeeld door de afbraak van vers organisch materiaal, komen elektronen vrij van een zogeheten 'elektronendonator'. Deze elektronen kunnen vervolgens worden opgenomen door 'elektronenacceptoren'. Deze processen leiden tot de vorming van bepaalde chemische stoffen, die vervolgens weer gebruikt kunnen worden in andere redoxreacties.

Deze reacties worden uitgevoerd door micro-organismen, die hier energie uit halen. Als maat voor de activiteit van redoxprocessen wordt de redoxpotentiaal gebruikt (uitgedrukt in mV). De opeenvolging van verschillende redoxprocessen leidt tot een 'getrapte' opeenvolging van chemische reacties. Processen die het meeste energie opleveren vinden hierbij als eerste plaats (zie afbeelding 3.14). Zo vindt in waterbodems als eerste de reductie van zuurstof plaats.

Wanneer de zuurstofconcentratie door deze afbraakprocessen daalt, zullen processen als nitraatreductie en ijzer(III)-reductie gaan optreden. Pas als zuurstof-, nitraat-, mangaan- en ijzerreductie uitgeput zijn, dan gaat sulfaatreductie een belangrijke rol spelen. Naarmate de reacties moeilijker verlopen en de micro-organismen er minder energie uit halen, daalt de redoxpotentiaal. Brakke wateren met een organisch rijke waterbodem worden vaak gekenmerkt door sterk reductieve zwavelrijke milieus waar sulfaatreductie een dominante rol speelt.

AFBEELDING 3.14 DE REDOXPOTENTIAAL EN RELATIEVE CONCENTRATIES VAN VERSCHILLENDE ELEKTRONENDONOREN. (LINKS) HET VERBAND TUSSEN DE REDOXPOTENTIAAL EN DE AFBRAAKSNELHEID. (RECHTS) EEN SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN VERSCHILLENDE REDOXPROCESSEN DIE ELKAAR OPVOLGEN IN DE TIJD, WAT LEIDT TOT EEN AFNAME OF TOENAME VAN VERSCHILLENDE STOFFEN



Een verandering in zoutconcentratie beïnvloedt direct en indirect de redoxreacties (afbeelding 3.14). Zo leidt een verhoogde zoutconcentratie direct tot een verhoogde sulfaatbeschikbaarheid maar kan dit indirect ook leiden tot een verhoogde beschikbaarheid van bijvoorbeeld mangaan en ammonium door kationmobilisatie. De effecten van veranderende zoutconcentraties zijn hiermee direct verweven met effecten op redoxreacties. Redoxprocessen treden zowel in mariene als zoetwatersystemen op en in beide systemen zijn verschillende groepen van micro-organismen verantwoordelijk voor deze processen (Herbert *et al.*, 2015).

Welke groepen micro-organismen een rol spelen in brakke wateren met fluctuerende zoutgehalte en in welke mate micro-organismen van beide systeem zich aan kunnen passen aan veranderende zoutconcentraties blijft complex en is deels nog een kennislacune (Day *et al.*, 2008, Craft *et al.*, 2009). Wel is bekend dat de variatie aan micro-organismen in brakke wateren erg groot is en lijkt het erop dat micro-organismen zich op termijn aan de veranderende condities aanpassen waarna het verloopt van redoxprocessen vergelijkbaar is tussen zoete en mariene systemen. Wel is door de hoge beschikbaarheid van sulfaat in brakke en zoute milieus de waterbodem vaak snel sterk gereduceerd terwijl dit in zoete systemen niet het geval is. Waterbodems in brakke wateren vertonen hierdoor vaak meer overeenkomsten met zoute dan met zoete wateren.

In zoete wateren is de beschikbaarheid van nutriënten (veelal fosfaat) één van de meest bepalende factoren voor de samenstelling van de leefgemeenschap en het ecologisch functioneren omdat fosfaat veelal het limiterende element is voor algengroei. Ook in de matig en sterk brakke wateren spelen nutriënten een doorslaggevende rol, met het verschil dat veelal stikstof – in plaats van fosfaat – het limiterende element voor algengroei is in deze wateren (onder andere Heckey & Kilham 1988, Rabalais 2002). Dit verschil tussen zoete en brakke wateren wordt in belangrijke mate bepaald door de kringlopen van verschillende nutriënten (zoals N en P), in relatie tot de ijzer- en zwavelcyclus. De stikstof en fosforcyclus worden direct door veranderende zoutgehalte beïnvloed maar ook indirect via effecten van zout op ijzer- en zwavelcyclus en redoxreacties.

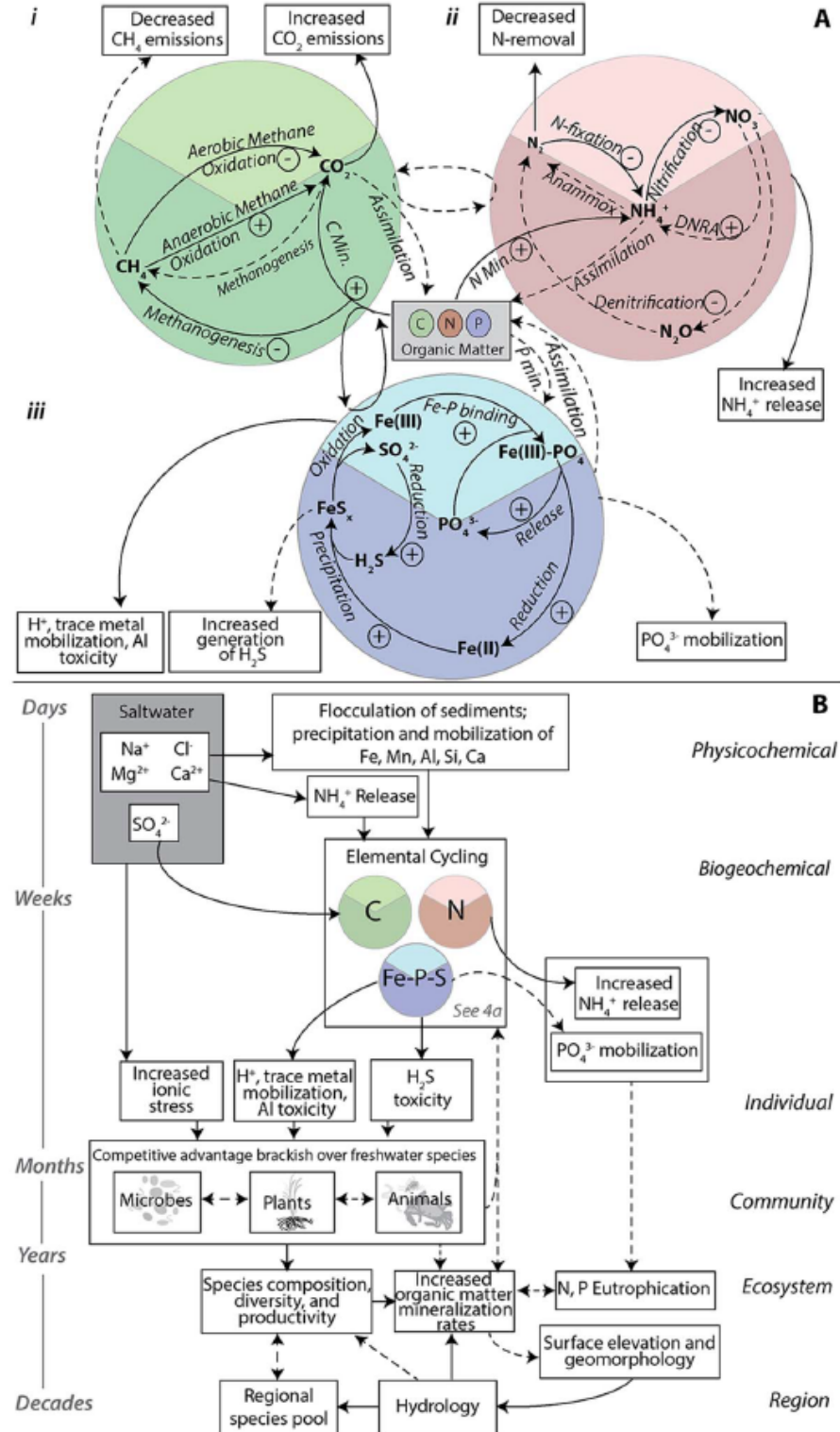
DE STIKSTOF CYCLUS

Microbiële processen spelen een grote rol bij de beschikbaarheid van stikstof in de waterkolom en het sediment. In afbeelding 3.15 zijn deze processen schematisch weergegeven. Stikstof kan in verschillende vormen aanwezig zijn, zoals ammonium, nitraat, nitriet of ammoniak.

In afbeelding 3.15 is te zien dat verschillende processen in deze cyclus (nitrificatie, denitrificatie, stikstoffixatie, dissimilatieve nitraatreductie (DNRA), Anamox) leiden tot de omzetting van de ene vorm naar de andere (bijvoorbeeld: van nitraat naar nitriet). Het relatieve belang van bovengenoemde processen hangt allereerst af van de beschikbaarheid (en vorm) van stikstof. Verder spelen omgevingsfactoren een belangrijke rol, zoals de zuurstofbeschikbaarheid en de zuurgraad. Hieronder wordt toegelicht in welke mate het verloop van de stikstofcyclus verschilt tussen brakke en zoete systemen en in welke mate fluctuaties in zoutgehaltes de stikstofcyclus beïnvloeden. De stikstofcyclus in aquatische ecosystemen wordt op verschillende wijzen beïnvloed door een verandering in zoutgehalte:

1. stijging van ammonium-concentratie (NH_4^+) door kationmobilisatie;
2. de effecten van zout op verschillende microbiële stappen in de stikstofcyclus;
3. het ontstaan van ammonia/ammoniak door de aan het zoutgehalte gelieerde verhoging van de pH.

AFBEELDING 3.15 CONCEPTUEEL DIAGRAM VAN DE VERWACHTE VERANDERINGEN IN ZOETWATER ECOSYSTEMEN DOOR VERZILTING. (A) DE VERWACHTE VERANDERINGEN IN DE BIOCHEMISCHE CYCLUS IN ZOETE SYSTEMEN. VERANDERINGEN IN AEROBE (LICHTE 1/3 TAARTPUNTEN) EN ANAEROBE DONKERE 2/3 TAARTPUNTEN) BIOGEOCHEMIE ZIJN BESCHREVEN VOOR (I) KOOLSTOF (GROEN), (II) STIKSTOF (ROOD) EN (III) IJZER-FOSFOR-ZWAVEL (BLAUW). PIJLEN GEVEN PROCESSEN AAN DIE NAAR VERWACHTING ZULLEN VERSTERKEN (+) OF VERZWAKKEN (-). DEZE RICHTING VAN VERANDERING (+/-) IS ALLEEN AANGEGEVEN VOOR PROCESSEN WAAR EEN GROTE CONSENSUS OVER IS IN DE LITERAATUUR (DOORGETROKKEN PIJLEN). GESTIPPelde LIJNEN ZIJN PROCESSEN WAAR DE RICHTING VAN VERANDERING NOG NIET DUIDELIJK IS. (B) DE VERWACHTE VERANDERINGEN VAN VERZILTING OP DE SCHAAL VAN HET ECOSYSTEEM OP VERSCHILLENDE TIJDSCHALEN. DOORGETROKKEN PIJLEN REPRÉSENTÉREN EEN GROTE CONSENSUS, GESTIPPelde PIJLEN EEN LAGE CONSENSUS OF AFWEZIGHEID VAN ONDERZOEK. (HERBERT *ET AL.*, 2015)



Stijging van ammonium-concentratie door kation-mobilisatie

Brakke wateren bevatten vaak hoge concentraties van ammonium (NH_4^+). Dit is het gevolg van de hogere concentraties van kationen (zoals natrium, magnesium en calcium) in brak water die tot verdringing van NH_4^+ van het bodemadsorptiecomplex leiden. Hierdoor is er in brakke waterbodems minder NH_4^+ aan het bodemadsorptiecomplex gebonden in vergelijking met zoete waterbodems (Seitzinger *et al.*, 1991).

Dit betekent dat in systemen met een zoete waterbodem, NH_4^+ gemakkelijk gemobiliseerd kan worden bij stijgende ofwel fluctuerende zoutconcentraties. Deze mobilisatie kan al binnen enkele uren optreden (Weston *et al.*, 2006, 2010, Ardon *et al.*, 2013, Jun *et al.*, 2013, Van Dijk *et al.*, 2015). Een langere periode met fluctuerende zoutconcentraties kan tot uitputting leiden van aan het adsorptiecomplex gebonden NH_4^+ , zoals voor brakke waterbodems het geval is. Wanneer al het aan het bodemadsorptiecomplex gebonden NH_4^+ is gemobiliseerd, kan het sediment bij langere blootstelling aan zoet water – bijvoorbeeld door aanvoer van zoet water voor de landbouw – weer kationen (natrium en calcium) afgeven en uiteindelijk ook weer NH_4^+ vanuit het water binden.

Effecten van zout op verschillende microbiële stappen in de stikstofcyclus

De stikstofcyclus bestaat uit een aaneenschakeling van microbiële processen (afbeelding 3.15). Niet voor al deze stappen is gedetailleerde kennis beschikbaar over hoe de intensiteit van deze processen verandert als gevolg van een verandering in zoutgehalte. In anaerobe waterbodems is NH_4^+ vaak de dominante vorm van stikstof, doordat nitraat relatief snel wordt omgezet door nitraatreductie. Door kationmobilisatie (zie hierboven) neemt de beschikbaarheid van NH_4^+ voor (micro-)organismen toe bij een stijgend zoutgehalte. Hiernaast is de beschikbaarheid van NH_4^+ (los van externe aanvoer) afhankelijk van de afbraak van organisch materiaal in de waterbodem. Voor een uitgebreide beschrijving van alle processen, wordt de lezer doorverwezen naar onder andere Van Geest *et al.* (2022) en Herbert *et al.* (2015).

In de literatuur wordt gesteld dat de afbraak van organisch stof en stikstofmineralisatie sneller gaat in zoutere omstandigheden in vergelijking met zoete systemen door de hogere beschikbaarheid van sulfaat en, in mindere mate, ijzer (Craft, 2007, Noe *et al.*, 2013). Het netto effect van fluctuerende zoutgehaltes op de afbraak van organisch materiaal en verschillende stappen in de stikstofcyclus vereist echter nog aanvullend onderzoek. Hierbij moet niet vergeten worden dat een veranderende zoutconcentratie niet alleen leidt tot een veranderende osmotische druk, maar ook tot allerlei neveneffecten zoals redoxprocessen. Hierdoor zijn de effecten van fluctuerende zoutconcentraties op microbiële processen complex.

Ontstaan van ammonia en ammoniak door pH-verhoging

In brakke wateren met een hoge ammoniumconcentratie kan ammonium (NH_4^+) omgezet worden in het toxische ammonia (NH_3). Een dergelijke omzetting gebeurt bij een pH hoger dan 8. Omdat brakke wateren gekenmerkt worden door de combinatie van hoge ammoniumconcentraties in combinatie met een hoge pH, komt de vorming van ammonia regelmatig voor in brakke wateren (Burgin & Hamilton, 2007; 2008; Boon *et al.*, 1986; Tobias & Neubauer, 2009).

DE FOSFORCYCLUS

In tegenstelling tot de stikstofcyclus, wordt de fosforcyclus voornamelijk door chemische processen gestuurd en in mindere mate door microbiële omzettingen. De fosforcyclus is erg nauw verbonden met de ijzer- en zwavelcyclus, waardoor deze dus alsnog wordt beïnvloed door de combinatie van microbiële en chemische processen. Deze interacties spelen zich

af op de overgang van sediment naar water, op de grenslaag van anaeroob naar aerob. Zwavel is aerob aanwezig als sulfaat en kan onder anaerobe condities gereduceerd worden naar sulfide. Fe³⁺ oxides kunnen in anaerobe milieus gereduceerd worden naar Fe²⁺. Beide processen spelen zowel in zoete als brakke waterbodems een belangrijke rol (Lamers *et al.*, 1998; Roden en Wetzel, 1996; Kostka *et al.*, 2002). Juist deze interacties tussen fosfor, ijzer en zwavel hebben een grote invloed op de nutriëntenbeschikbaarheid in het aquatische ecosysteem (Smolders *et al.*, 2006; Burgin *et al.*, 2011) en dus ook in brakke wateren. Vooral de hoge concentraties van sulfaat in brak water spelen hierbij een belangrijke rol. Dit is het gevolg van de volgende processen:

- de hogere concentraties van sulfaat in brak water leiden in bodems die rijk zijn aan organische stof tot een hogere mineralisatie. Hoge sulfaatconcentraties stimuleren namelijk de afbraak van organische stof in de waterbodem, en bij deze afbraak komen nutriënten vrij. Dit kan tot een hogere beschikbaarheid van zowel stikstof als fosfor leiden (interne eutrofiëring) (Smolders *et al.*, 2006);
- bij deze afbraak wordt sulfaat gereduceerd tot sulfide. Deze stof heeft grote invloed heeft op vele andere microbiële processen (zoals de ijzercyclus, zie hieronder) en is voor veel soorten sterk toxisch (Lamers *et al.*, 2013);
- het gevormde sulfide hecht zich aan ijzer, waarbij pyriet (FeS) ontstaat (Lamers *et al.*, 2002a; Smolders *et al.*, 2006; Reddy en DeLaune, 2008). Dit pyriet-gebonden ijzer is niet meer beschikbaar als bindingsplaats voor fosfaat. Bij aanhoudende sulfaataanvoer onder verhoogde zoutgehaltes zal op den duur de ijzer- tot-fosfor ratio in het bodem poriewater sterk afnemen. Dit leidt tot een lagere bindingscapaciteit van het sediment voor fosfor, waardoor nalevering naar de bovenstaande waterlaag kan optreden (Geurts *et al.*, 2008);
- bij de vorming van pyriet wordt bovendien het eventueel aanwezige aan ijzer gebonden fosfaat van het ijzer verdrongen door sulfiden. Dit leidt eveneens tot een hogere beschikbaarheid van fosfaat in de waterkolom;
- de vorming van pyriet leidt tot weinig oxidatie van ijzer, waardoor de zuurgraad en ammoniakconcentraties van brakke wateren beduidend hoger zijn in vergelijking met zoete wateren.

De invloed van verhoogde sulfaatconcentraties in brakke wateren leidt dus vaak tot een hogere beschikbaarheid van fosfaat. Mede om deze reden is stikstof en niet fosfaat veelal het limiterende nutriënt voor de primaire productie in brakke wateren.

Kationen (mobilisatie) en fosforbeschikbaarheid

Brak water heeft niet alleen hogere concentraties van natrium, chloride en sulfaat, maar ook van kationen zoals calcium (Ca), magnesium (Mg) en soms ijzer (Fe). De hogere concentraties van deze kationen kunnen ook de fosfaatbeschikbaarheid beïnvloeden. Zowel Ca als Mg kunnen bindingen aangaan met fosfor en hiermee de beschikbaarheid van fosfor voor organismen verlagen (Reddy & DeLaune 2008, Jun *et al.*, 2013, Van Dijk *et al.*, 2019). In waterbodems die reeds rijk aan zwavel zijn, zoals in voormalig brakke wateren, is er vaak weinig tot geen fosfor meer aan het ijzer verbonden, waardoor veel fosfor beschikbaar kan zijn. Het kan echter ook zo zijn dat een verhoging van het zoutgehalte tot een daling van de fosfor beschikbaarheid kan leiden. De daling van de fosforbeschikbaarheid wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat natrium het calcium van het adsorptiecomplex verdringt en er vervolgens een neerslag van calcium met fosfaat ontstaat (Van Dijk *et al.*, 2015, 2019). In de praktijk is echter vaak de bijdrage van kationmobilisatie als gevolg van verhoogde zoutconcentraties relatief klein en heeft de ijzer-zwavel cyclus een grotere invloed op de fosforconcentraties. Hogere concentraties van ijzer kunnen de beschikbaarheid van fosfor eveneens

verlagen, zeker in combinatie met een aerobe top laag van de waterbodem, waar neerslag van Fe-P verbindingen optreedt. Op deze manier kan fosfaat, dat gemobiliseerd is in diepere anaerobe sedimentlagen, alsnog worden vastgelegd in de bovenste (aerobe) sedimentlaag, zodat het niet naar de waterlaag diffundeert (Van Diggelen *et al.*, 2014).

3.4.2 INVLOED VAN ONTSTAANSGESCHIEDENIS

De effecten van zoet-zout dynamiek hangen niet alleen samen met een veranderend zoutgehalte, maar ook met de ontstaansgeschiedenis. Met de ontstaansgeschiedenis doelen we hier op de samenstelling en het type (water)bodem, overgeërfd van de aan- of afwezigheid van historische zoutinvloed. Afhankelijk van de ontstaansgeschiedenis reageren zoete en brakke systemen anders op een veranderend zoutgehalte. Om de gevolgen van de historische zoutinvloed te kunnen duiden, wordt er onderscheid gemaakt in de volgende drie gebieden:

1. permanent brakke gebieden, eventueel met zoete invloeden;
2. voorheen brakke/zoute gebieden die nu (deels) verzoet zijn;
3. gebieden die oorspronkelijk zoet zijn, en die nu blootgesteld kunnen worden aan zout(pulsen).

EFFECTEN IN HET WATER

De effecten van verzilting van het oppervlaktewater hangen nauw samen met het bodemtype (zand, klei, veen) en de chemische samenstelling van de bovenliggende (slib)laag. Als gevolg hiervan kan verzilting in het ene gebied tot eutrofiering leiden, terwijl dit in het andere gebied juist leidt tot een afname van de nutriëntenbeschikbaarheid (Herbert *et al.*, 2015, van Dijk *et al.*, 2019). Gebieden die onder brakke condities zijn ontstaan en naderhand zijn verzoet, zijn veelal minder gevoelig voor verzilting dan gebieden met een zoete ontstaansgeschiedenis. Bij verzilting kunnen we onderscheid maken tussen effecten op de korte en lange termijn.

Op de korte termijn (al binnen enkele uren) kan een hoge zoutconcentratie leiden tot de verdringing van kationen van het bodemadsorptiecomplex (Seitsinger 1991; Weston *et al.*, 2006). Afhankelijk van de samenstelling van de bodem kunnen hierdoor bijvoorbeeld ammonium, calcium, ijzer of fosfor aan de waterlaag worden afgegeven (Van Dijk *et al.*, 2015). Het belang van dit proces hangt nauw samen met de bindingscapaciteit van de bodem.

Het adsorptiecomplex is namelijk groter in veen- en kleibodems dan in zandbodems. Veen- en kleibodems bevatten meer ionen die aan het adsorptiecomplex zijn gebonden, waardoor deze bodems meer van deze ionen kunnen afgeven tijdens het proces van verzilting. Het gevolg van de kation-verdringing is sterk afhankelijk van de samenstelling van de waterbodem. Ter illustratie, calcium ofwel ijzer dat vrij komt, kan bijdragen aan een daling van de fosforconcentratie door neerslag met fosfor in het bodemvocht. Ammonium dat vrij komt, leidt tot een snelle toename van ammonium ook in de waterlaag. Dit kan leiden tot ammoniumtoxiciteit ofwel onder hoge pH ammoniaktoxiciteit.

Op langere termijn leidt verzilting mogelijk tot een lagere beschikbaarheid van ammonium. Het eerder vrijgekomen ammonium in de waterlaag kan namelijk worden genitrificeerd tot nitraat (alleen onder zuurstofrijke condities), wat na denitrificatie uit het water verdwijnt (van Dijk *et al.*, 2019). Naast een mogelijk lagere beschikbaarheid van ammonium, nemen sulfaatconcentraties toe, waardoor op langere termijn de effecten van sulfaatreductie gaan overheersen. Het risico op de vorming van giftige sulfiden en ammoniak neemt hierdoor toe.

De mate waarin sulfaatreductie en de vorming van giftige sulfiden en ammoniak optreedt, hangt sterk af van de ontstaansgeschiedenis van een gebied. Waterbodems die in brakke condities zijn gevormd, bevatten vaak nog steeds hoge concentraties zwavel in het sediment, ook als het bovenstaande oppervlaktewater is verzoet. Hierdoor bevindt zich in deze bodems veel gereduceerd zwavel in de waterbodem, wat zich deels als sulfide aan ijzer heeft gebonden. Aangezien deze binding sterker is dan de binding tussen ijzer en fosfor, is er nauwelijks ijzergebonden fosfor in deze bodems aanwezig. Hierdoor kan sulfaatreductie in deze bodems niet tot een sterke nalevering van (ijzergebonden) fosfor leiden. Daarentegen zijn de zwavelgehalten in (van oorsprong) zoete waterbodems van nature vele malen lager, terwijl de hoeveelheid ijzergebonden fosfor vaak juist (beduidend) hoger is. In deze (van oorsprong) zoete bodems kan sulfaatreductie juist wel tot een sterke nalevering van fosfor naar de waterkolom leiden, doordat het gevormde sulfide beter aan ijzer hecht en zodoende het ijzergebonden fosfor verdringt (Smolders *et al.*, 2006).

De mate waarin sulfaatreductie een rol speelt na verzilting wordt ook beïnvloed door de beschikbaarheid van gemakkelijk afbreekbaar (reactief) organisch materiaal. In welke mate verzilting de afbraak van organisch stof stimuleert of juist remt, is sterk afhankelijk van de uitgangssituatie en betreft deels nog een kennislacune. Er zijn studies met ogenschijnlijk tegenstrijdige resultaten. Sommige laten een afname zien van de afbraak van organisch materiaal door verzilting, terwijl bij andere een toename wordt geobserveerd (Herbert *et al.*, 2015). Een lagere afbraak kan het gevolg zijn van osmotische stress voor micro-organismen die voor deze afbraak verantwoordelijk zijn. Een toegenomen beschikbaarheid van sulfaat kan de afbraak juist weer stimuleren. Dit geldt vooral voor bodems die rijk aan organische stof zijn, zoals veenbodems en organisch rijke slibbodems. In deze bodems is de invloed van sulfaat op de toename van de fosforbeschikbaarheid vele malen groter dan in bodems met een laag organisch stof gehalte. Wanneer er geen reactief organisch materiaal aanwezig is, dan kan er geen sulfaatreductie en sulfidevorming optreden omdat sulfaatreductie dan gelimiteerd wordt door een gebrek aan organisch materiaal.

Uiteraard speelt de nutriëntenrijkdom van de bodem ook een belangrijke rol. Immers, hoe meer nutriënten er in een bodem opgeslagen liggen, hoe groter de potentiële effecten van verzilting kunnen zijn. Dit geldt niet alleen voor de oorspronkelijke bodem, maar ook voor de bovenliggende sliblaag. Juist deze sliblaag bestaat in veel Nederlandse wateren uit gemakkelijk afbreekbaar, nutriëntenrijk organisch materiaal dat afkomstig is van omliggende landbouwpercelen, of van afgestorven algen- en plantenmateriaal. En juist de sliblaag komt als eerste in aanraking met verhoogde zoutconcentraties tijdens verzilting.

EFFECTEN OP DE BODEM (OP HET LAND)

Ook op het land maakt de bodemsamenstelling uit voor hoe een gebied reageert op verzilting of verzoeting. Hierbij focussen we op de kennis die beschikbaar is vanuit de functie landbouw, waarvoor alleen verzilting (en geen verzoeting) een probleem vormt. Vanuit de terrestrische natuur is hier namelijk weinig over bekend. Desalniettemin is de landbouwkennis over de effecten op de bodem mogelijk ook van toepassing op de terrestrische natuur.

Met de 'bodem' wordt in de landbouw voornamelijk bedoeld op de wortelzone. In de meeste gevallen is de bovenste 30 cm van de bodem de meest belangrijke bodemlaag voor gewassen. Wortels kunnen uiteraard veel dieper komen en reiken tot de laag van 30 tot 60 cm diep. Dit is wel per gewas verschillend en in langere periodes van droogte zullen wortels nog dieper dan 60 cm gaan op zoek naar (zoet) water. Desondanks is de gangbare regel dat de bovenste

30 cm van de bodem als de meest belangrijke laag wordt gezien en dat het merendeel van de wortels zich in de bovenste 60 cm van de bodem bevinden. Om de effecten van zoet-zout dynamiek te bepalen, ligt de focus dus op de bovenste 30 cm.

Zout dat in de bodem terecht komt, kan resulteren in structuurschade van de bodem. Dit beïnvloedt op z'n beurt weer de bewortelbaarheid, de beluchting en de bewerkbaarheid van de bodem.

Qua bodemstructuur zijn er een aantal facetten belangrijk die de effecten van verzilting beïnvloeden. Dit zijn parameters zoals het waterbergend vermogen, de mate van infiltratie en de veldcapaciteit (Minhas en Qadir, 2024). Voor het waterbergend vermogen geldt dat het effect van verzilting groter is in bodems met een laag waterbergend vermogen. Er is dan namelijk weinig (zoet) bodemvocht aanwezig om het zouter gietwater te verdunnen. Een zandige bodem met een laag percentage klei en organische stof verzilt hierdoor snel. Bodems met een hoog percentage klei en organische stof hebben een hoog waterbergend vermogen en dus een grotere capaciteit om het zoutere gietwater te verdunnen.

Voor de infiltratie van water geldt het omgekeerde: in een zandige bodem kan giet- en regenwater gemakkelijker infiltreren en kan brak water in de wortelzone gemakkelijk weer uitspoelen. Dit is bij kleibodems met een hoog kleipcentage juist omgedraaid, waarbij de uitspoeling moeilijker verloopt.

3.5 BIOLOGIE

De hydrologie en biogeochemie beïnvloeden de biologische processen die kunnen plaatsvinden in een bepaald vastgesteld watersysteem of perceel. In deze paragraaf wordt toegeacht hoe de hydrologische en biogeochemische processen doorwerken op de biologie. Eerst beschrijven we de fysiologische mechanismen die optreden door een verandering van zoutgehalte en kunnen bijdragen aan stress voor soorten en doelgewassen (paragraaf 3.5.1). Vervolgens gaan we in op de biogeochemische interacties die leiden tot stress (paragraaf 3.5.2). Het belang van de ontstaansgeschiedenis en de resulterende bodemeigenschappen worden behandeld in paragraaf 3.5.3. Deze paragraaf over biologie sluit af met een classificatie van doelgewassen naar stress tegen zoutgehalte.

3.5.1 FYSIOLOGISCHE MECHANISMEN DOOR HET ZOUTGEHALTE

Het zoutgehalte heeft z'n weergave op de fysiologische mechanismen in planten en de resulterende soortensamenstelling (in het geval van natuur). Hierbij maken we onderscheid tussen (1) stress die ontstaat door het intrinsieke processen door een veranderend zoutgehalte en (2) stress door veranderende randvoorwaarden door beheerkeuzes waardoor de effecten van het zoutgehalte groter of kleiner kunnen uitvallen.

STRESS DOOR ZOUT

De effecten van zout op planten zijn vooral bij landplanten onderzocht (Munns & Tester, 2008), maar onderzoeken bij waterplanten geven vergelijkbare resultaten. De effecten van zout op planten zijn tweeledig. Er zit een osmotische kant aan (vergelijkbaar met droogte(stress)) en een ionische (toxische werking en verstoorde nutriëntenopname). Toxische stress door zout ontstaat bij een stijgend zoutgehalte van de omgeving, waardoor steeds meer zout in het cytoplasma van de cellen ophoopt. Een te hoge zoutconcentratie heeft een negatieve invloed op basale processen in het cytoplasma van plantencellen, zoals de aanmaak van enzymen

en processen die daarmee samenhangen (Kronzucker *et al.*, 2013). Bovendien gaan zowel natrium als chloride en borium meer concurreren met binding- en opnameplaatsen voor essentiële voedingsstoffen (bijvoorbeeld K^+ , NH_4^+ , NO_3^- en PO_4^{3-}) (Munns en Tester, 2008). Deze concurrentie leidt tot een onbalans van nutriëntenconcentraties.

Het effect op plantengroei op de korte termijn is een afname in blad- en wortelgroei. Dit effect treedt onmiddellijk op, binnen minuten na blootstelling aan een hoger zout (Zhao *et al.*, 2020) en is evenredig aan het osmotisch potentiaal van het water waaraan de plant staat blootgesteld. Het is dus aannemelijk dat dit komt door een vochtgebrek in de plant, en dit effect is ook snel weer om te draaien, waarna plantengroei weer normaal hervat. Wortelgroei neemt minder af wanneer een plant blootgesteld wordt aan zout en wordt binnen een uur hervat na blootstelling aan zout, maar wel gereduceerd (Zhao *et al.*, 2020). Het verschil in reactie tussen de boven en ondergrondse plantdelen (de wortels reageren minder sterk op zout dan de stengels en bladeren) leidt op termijn tot een verschuiving in de ratio tussen bovengrondse en ondergrondse plantdelen. Wanneer de stress aanhoudt (weken tot maanden), gaan ook de toxische effecten van de zoutophoping in (oude) bladeren meetellen en op den duur komt het simpelweg neer op het volgende: als een plant sneller nieuwe bladeren kan maken dan dat het oude verliest als gevolg van zouttoxiciteit, kan de plant blijven leven. Als hij sneller bladeren verliest dan nieuwe kan maken, sterft de plant.

Er zijn planten die zouttolerant zijn. Zulke planten noemen we halofyten. Er zijn een drietal halofyten te onderscheiden ('echte', facultatieve en indifferente halofyten). Een 'echte' halofyt is afhankelijk van een zoute omgeving en heeft een concurrentievoordeel tegenover soorten die niet zijn aangepast aan een zoute omgeving. Een 'echte' halofyt kan niet kiemen in een zoete omgeving. Er bestaan ook facultatieve halofyten. Dit zijn planten die kunnen overleven in een zoute omgeving, maar er niet van afhankelijk zijn. Daarnaast zijn er indifferente halofyten die zowel in een zoet als een zout milieu kunnen overleven, zij het binnen een gering bereik van zoutgehalten.

Uit onderzoek is gebleken dat planten ook actief in staat zijn om hun wortelstelsel aan te passen waarbij ze zout in de ondergrond vermijden en juist wortelen in die delen van de bodem die zoet zijn. Dit wordt ook wel halotropisme genoemd (Galvan-Ampudia *et al.*, 2013). Pas als het echt niet anders kan (wanneer het zoete water overal op is) zullen planten het meer zoute water opnemen.

BEHEER

De vegetatiesamenstelling is niet alleen van het zoutgehalte afhankelijk. Zo kan het wegvallen van beheer de successie in een bepaalde richting duwen. Het stopzetten van begrazing op brakwaterschorren doet riet toenemen ten koste van zilte graslanden met gewoon kweldergras, zilte rus en fioringras. Successie kan in hoog dynamische systemen snel verlopen waardoor habitattypen uit een gebied verdwijnen. Zo'n snelle successie kan daarbij samenhangen met verstoringen, bijvoorbeeld door ingrepen die de hydrodynamiek beïnvloeden in de zilte habitats (Van Calster *et al.*, 2019).

Beheer in de vorm van bemesting (voor landbouwgewassen) beïnvloedt de complexe interactie tussen verschillende zouten en essentiële nutriënten. Zo zullen de verhoogde concentraties van niet alleen natrium en chloride, maar ook die van bijvoorbeeld sulfaat en magnesium ervoor zorgen dat bepaalde nutriënten minder beschikbaar zijn en minder opgenomen zullen worden. Dit heeft met name betrekking op micronutriënten, maar ook de belangrijke

macronutriënten nitraat, fosfaat en kalium. Deze verschillende interacties staan uitvoerig beschreven in Bhardwaj en Nagaraja (2020). Dit effect van verzilting op de bemesting kan een zeer groot effect hebben op de uiteindelijke gewasgroei.

Beheer in de vorm van beregening (voor landbouwgewassen) kan negatieve gevolgen hebben voor het fysiologisch functioneren van gewassen. Als het water direct op het blad terecht komt, dan kunnen zouten ook direct via het blad in de plant terecht komen wat heel snel tot bladschade (bladverbranding) kan leiden. Bladschade kan al snel leiden tot een economisch schade bij de sierteelt en bladgroentes (zichtbare schade aan blad heeft effect op de verkoopwaarde). Aanzienlijke bladschade leidt sowieso tot een verminderd actief bladoppervlak en daarmee ook verminderde groei en opbrengst. De mate van schade door zoutopname via het blad hangt van vele factoren af, zoals het weer (meer schade bij droog, warm weer), bladeigenschappen (vorm, stand, positie), leeftijd van het blad, type gewas en uiteraard de zoutconcentratie van het water zelf (Van Dam *et al.*, 2007).

3.5.2 FYSIOLOGISCHE MECHANISMEN DOOR SULFIDE EN AMMONIUM TOXICITEIT

Naast zout bevat brak en zout water ook verhoogde concentraties van onder andere ammonium en sulfaat. Zowel ammonium als sulfaat kunnen in oppervlaktewater omgezet worden naar voor organismen giftige stoffen en spelen hiermee een belangrijke rol voor het ecologisch functioneren.

STRESS DOOR SULFIDE VERGIFTIGING

De hogere concentratie van sulfaat in brakke wateren vergroot niet alleen de beschikbaarheid van fosfor (zoals beschreven in paragraaf 3.4.1), maar kan onder anaerobe condities in de waterbodem ook tot sulfaatreductie en de vorming van het giftige sulfide leiden. Sulfide kan al bij lage concentraties ($\mu\text{mol/L}$) giftig zijn (Koch & Mendelssohn, 1989; Bagarinao, 1992; Lamers *et al.*, 2013; Myrbo *et al.*, 2017; Parveen *et al.*, 2017a, 2017b; Pollman *et al.*, 2017; Sakai *et al.*, 2013; van der Welle *et al.*, 2008).

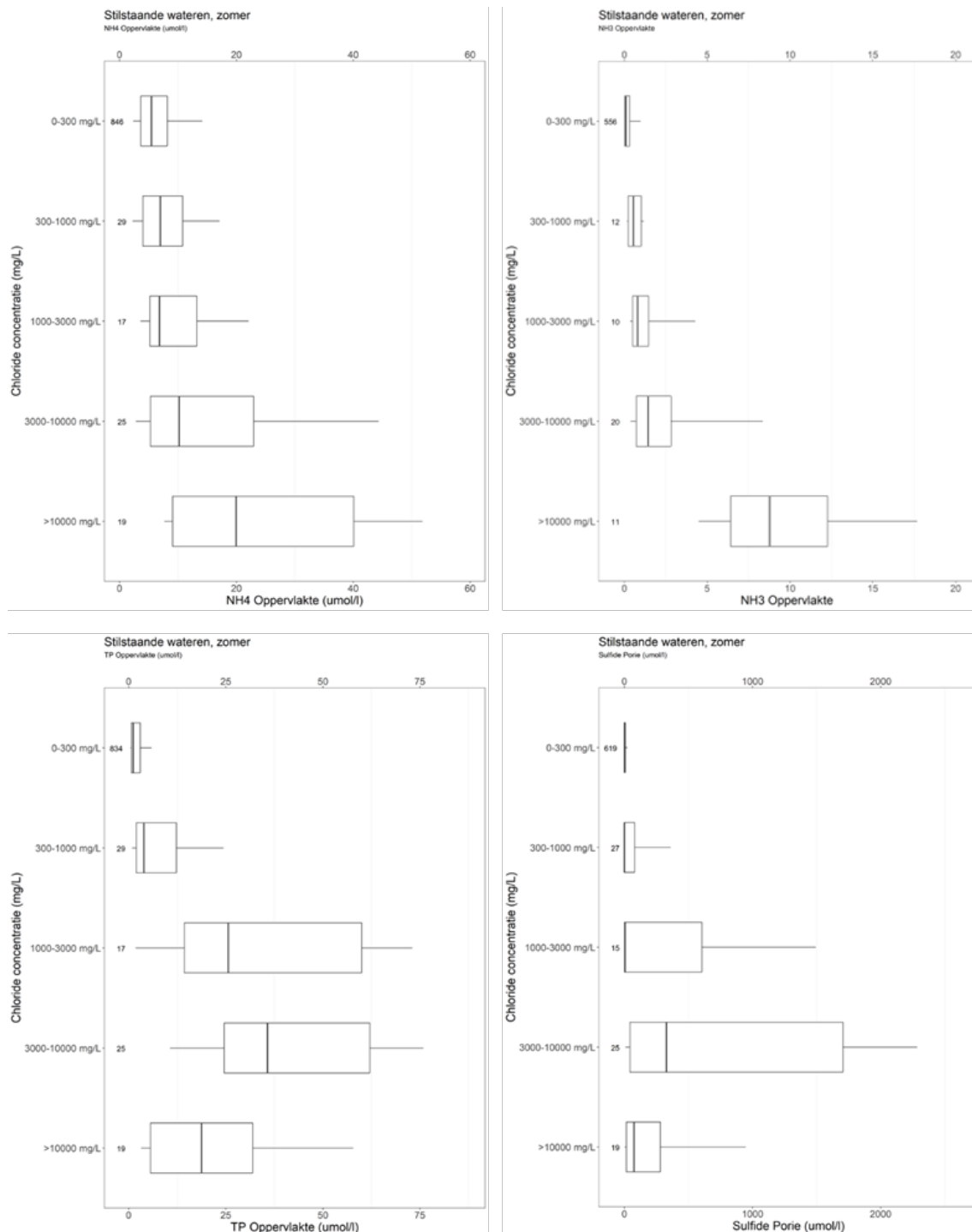
De giftigheid van sulfide hangt niet alleen af van de productie van sulfide maar ook van de actuele concentratie (beschikbaarheid). Zo wordt sulfide gebonden in sedimenten met hoge ijzerconcentraties. Zolang er afdoende ijzer beschikbaar is, is hierdoor geen (giftig) vrij sulfide meer aanwezig. Veel brakke wateren bezitten een lage beschikbaarheid van ijzer in het bodemvocht, waardoor de sulfide concentraties snel giftig worden. Aangezien sulfide alleen in de (zuurstofloze) waterbodem wordt gevormd, is dit vooral giftig voor wortelende waterplanten (Lamers *et al.*, 2013). Deze gevoeligheid is wel soort-specifiek (onder andere Lamers *et al.*, 2013). Sommige waterplanten verlagen de sulfide-concentraties door de uitstoot van zuurstof in de wortelzone, waardoor het sulfide wordt geoxideerd (Lamers *et al.*, 2013). Deze mechanismen werken natuurlijk voornamelijk als een soort met een groot aantal individuen aanwezig is en hiermee een verhoudingsgewijs een grote invloed heeft op de wortelzone.

STRESS DOOR AMMONIUMVERGIFTIGING

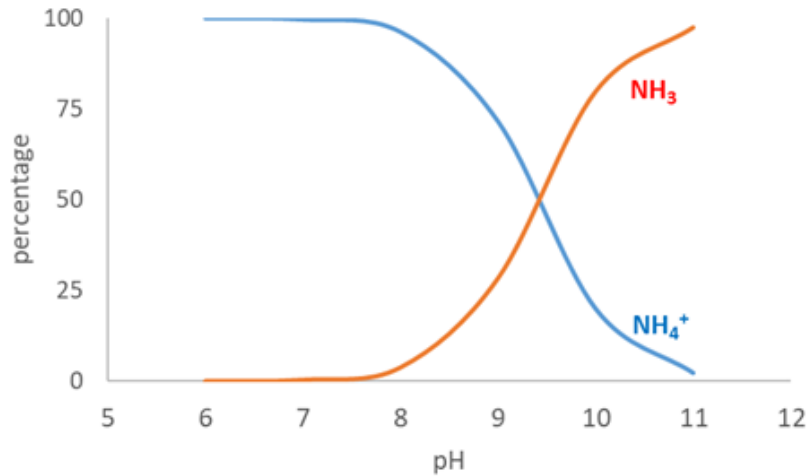
Naast sulfaat bevatten brakke wateren vaak ook hogere concentraties van ammonium. Deels is dit het gevolg van de versnelde afbraak van organisch materiaal (door het hogere sulfaatgehalte, zie hierboven), waardoor veel ammonium kan vrijkomen. Hiernaast kan bij toenemende of fluctuerende zoutconcentraties ook verdringing van ammonium aan het adsorptiecomplex optreden, als gevolg van de hogere concentraties van andere positief geladen ionen (zoals natrium en kalium), zie ook paragraaf 3.4.1. Als gevolg van een hogere ammoniumconcentratie kan in brakke wateren sneller toxiciteit van ammoniak ontstaan. Opgelost ammonium wordt onder bepaalde omstandigheden omgezet naar ammoniak, wat reeds in

lage concentraties giftig is voor waterplanten en andere soortgroepen. De verhouding tussen ammonium en ammoniak is een evenwichtsreactie, die afhankelijk is van de zuurgraad en temperatuur (afbeelding 3.16). Vanaf een zuurgraad hoger dan 8 wordt ammonium omgezet in ammoniak, en bij een zuurgraad boven de 9.5 bestaat het merendeel uit ammoniak. Deze omzetting naar ammoniak kan juist in brakke wateren een grote rol spelen, omdat in brakke wateren geregeld verhoogde ammoniumconcentraties aanwezig zijn in combinatie met een hoge zuurgraad. In afbeelding 3.17 is dit geïllustreerd met boxplots van NH_4^+ , NH_3 en TP (totale fosfor) in oppervlaktewater, en sulfide-concentraties in poriewater van resp. zoete, zwak brakke, matig brakke, sterk brakke en mariene wateren gegeven. De lijnen geven resp. de 10-, 25-, 50-, 75- en 90-percentiel waarden weer.

AFBEELDING 3.16 RELATIE TUSSEN AMMONIUM EN AMMONIA IN RELATIE TOT DE ZUURGRAAD VAN HET WATER



AFBEELDING 3.17 BOXPLOTS VAN NH_4^+ , NH_3 EN TP (TOTALE FOSFOR) IN OPPERVLAKTEWATER, EN SULFIDE-CONCENTRATIES IN PORIEWATER VAN RESP. ZOETE, ZWAK BRAKKE, MATIG BRAKKE, STERK BRAKKE EN MARIENE WATEREN. DE LIJNEN GEVEN RESP. DE 10-, 25-, 50-, 75- EN 90-PERCENTIEL WAARDEN WEER

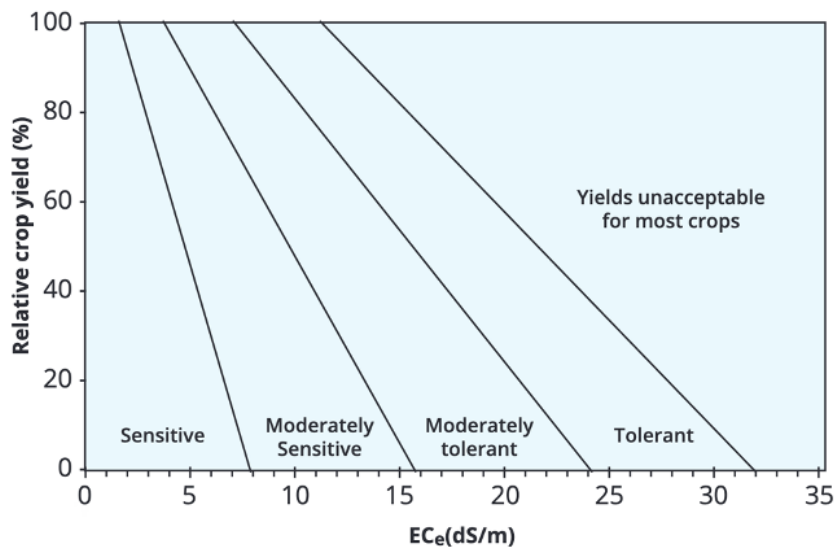


3.5.3 CLASSIFICATIE VAN GEWASSEN

De zouttolerantie van een gewas wordt vaak uitgedrukt als de maximale zoutconcentratie (bodempzoutconcentratie, gemeten als ECe) waarbij nog geen gewasschade optreedt (de drempelwaarde). Verder kijkt men vervolgens naar de afname na deze drempelwaarde; hoe snel gaat de opbrengst achteruit bij een toenemend zoutgehalte. Dit model is oorspronkelijk ontworpen door Maas en Hoffman (1977). afbeelding 3.18 laat grafisch zien hoe het werkt. Op basis van deze indeling is een gewas dus of 'sensitive' (gevoelig), 'moderately sensitive' (matig gevoelig), 'moderately tolerant' (matig tolerant) of 'tolerant' (tolerant). Binnen deze methode wordt uitgegaan van 4 verschillende klassen.

Hierbij wordt uitgegaan van de relatieve opbrengst waarbij zonder zout de opbrengst 100 % bedraagt. Een zoutgevoelig gewas zal al bij een lage zoutconcentratie (volgens onderstaande afbeelding is dat zelfs al onder een ECe van 2 dS/m) een verminderde opbrengst laten zien. Een matig gevoelig gewas laat in de regel een eerste effect zien wanneer de ECe tussen de 2,0 en 3,5 dS/m ligt, matig tolerant ligt tussen de 3,5 en 6,5 dS/m en tolerant ligt tussen de 6,5 en 10 dS/m.

AFBEELDING 3.18 MODEL VAN HET EFFECT VAN ZOUT OP GEWASSEN (NAAR MAAS EN HOFFMAN, 1977)



Recentelijk zijn er pogingen gedaan om het effect van zout op een bepaald gewas of ras te verbeteren om zo de spreiding te verkleinen. Dit is gelukt met de introductie van een nieuwe parameter om de tolerantie voor zout van een gewas aan te geven: de EC90 (Van Straten *et al.*, 2019). Dit is de EC-waarde waarbij er nog 90 % van de opbrengst verwacht mag worden ten opzichte van de opbrengst onder zoete omstandigheden. Het blijkt dat deze parameter een betere, meer robuuste, betrouwbare en herhaalbare inschatting geeft van de zouttolerantie van een gewas. Mede hierdoor is het nu mogelijk om statistisch significante verschillen in zouttolerantie tussen rassen binnen een gewas aan te tonen, op basis van veldproeven. Bijkomend voordeel is dat het beschouwen van 'drempelwaardes' waarbij nog 90 % opbrengst is, beter overeenkomt met de classificatie van de bodemzoutconcentraties (paragraaf 3.2.2).

TABEL 3.7 GLOBALE CLASSIFICATIE VAN BODEM EN GEWAS, OP BASIS VAN DE ZOUTCONCENTRATIE (GEMETEN ALS ECE VAN DE EC90). DE ZOUTCONCENTRATIE IN MG CL/L IS BEREKEND OP BASIS VAN DE RESULTATEN VAN TABEL 3.1

Zoutconcentratie EC90* (Ece, in dS/m)	Zoutconcentratie (in mg Cl/l)	Classificatie bodem	Classificatie gewas
<2,0	< 400	zoet	(zeer) Gevoelig
2,0 - 4,0	400 - 1.100	licht zout	Matig gevoelig
4,0 - 8,0	1.100 - 2.600	matig zout	Matig tolerant
8,0 - 12,0	2.600 - 4.250	sterk zout	Tolerant
>12,0	>4.250	zeer sterk zout	

* De EC waarde waarbij nog 90 % opbrengst van het gewas optreedt.

Het effect van zout op een gewas is echter complex en deze drempelwaarde of EC90 is in de praktijk geen vast getal. Het ligt dus voor de hand om niet uit te gaan van één vast getal maar eerder van een bepaalde bandbreedte of richtlijn waarbinnen de eerste gewasschade zou kunnen optreden. Daarnaast zijn er vaak ook nog verschillen in zouttolerantie tussen rassen. Alhoewel er diverse onderzoeken en rapporten te vinden zijn die meer inzicht geven in de zouttolerantie van een gewas, wordt dit maar zelden gedaan voor (vele) verschillende rassen van een specifiek gewas. Waar dat wel is gedaan, worden er dus vaak verschillen in zouttolerantie tussen rassen gevonden. Zo kan de zouttolerantie van een aardappel met maar liefst een factor 3 verschillen tussen rassen (Van Straten *et al.*, 2021).

De tolerantie is daarnaast afhankelijk van het groeistadium van het gewas en tijdsduur van de blootstelling aan zout (zie paragraaf 6.4 voor meer details). Zo zal een verhoogde zoutconcentratie rond de kieming en de eerste groei meestal een groter effect hebben dan een zoutpiek aan het einde van het seizoen. Ook heeft het (lokale) klimaat, bodemcondities en de gebruikte teeltmethode een effect op de tolerantie. Verder zal de zoutmeting in de bodem altijd wat variatie laten zien, waardoor het effect op de gewassen minder goed is in te schatten.

4

AQUATISCHE ECOLOGIE

4.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de kennis over de effecten van zout op aquatische ecosystemen. Hierbij bespreken we eerst de effecten van zout op de soortenrijkdom, soortensamenstelling en ecologisch functioneren van watersystemen (paragraaf 4.2). Vervolgens gaan we in op een paar stelregels die getrokken kunnen worden voor de eigenschappen van een zoutpuls (paragraaf 4.3). Aansluitend bespreken we deze kennis op tot grenswaarden voor verzilting (paragraaf 4.4) en verzoeting (paragraaf 4.5). Hierna volgt een korte uitwerking over de hersteltijd (paragraaf 4.6), als ook de kennishiaten die thans nog gelden (paragraaf 4.7). Een samenvatting van de grenswaarden die relevant zijn voor het afwegingskader is opgenomen in paragraaf 4.8.

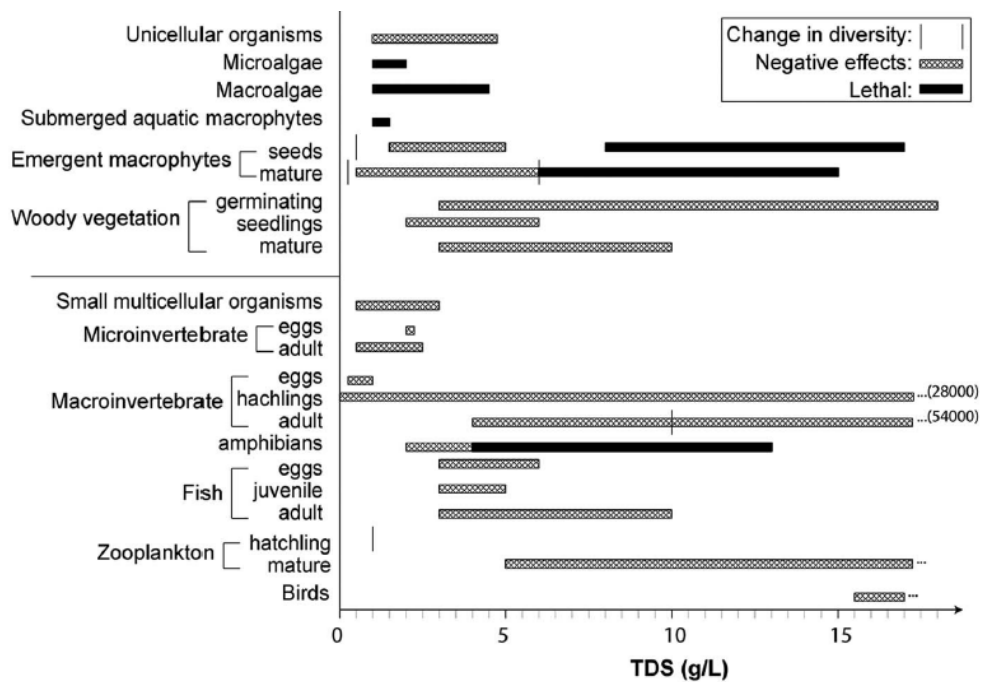
4.2 EFFECTEN VAN ZOUT OP SOORTEN EN ECOLOGISCH FUNCTIONEREN

4.2.1 SOORTENRIJKDOM

Brakke wateren staan bekend om hun lage soortenrijkdom. Al in het begin van de vorige eeuw ontdekte de onderzoeker Remane dat het aantal macrofaunasoorten in het matig brakke gebied van de Oostzee heel laag is. Op basis van dit onderzoek is de zogeheten 'curve van Remane' opgesteld (Remane, 1934). Deze curve geeft aan dat in de overgang van zoet naar zout de soortensamenstelling en daarmee de biodiversiteit verandert. Doorgaans geldt een lage soortenrijkdom voor brakke systemen (saliniteit tussen 5 - 8 ‰ (zie tabel 3.2 voor een omrekening richting Cl⁻) en een sterke toename van mariene soorten bij zoutgehalten boven 10 ‰. Bij een saliniteit onder 5 ‰ voeren zoetwatersoorten de boventoon, terwijl in zoutere wateren (>10 ‰) voornamelijk mariene soorten voorkomen. Vanaf een saliniteit van 3 ‰ neemt het aandeel aan brakke soorten toe. Vooral wateren met een saliniteit tussen 5 ‰ en 10 ‰ worden gekenmerkt door een relatief groot aantal brakke soorten. De Remane curve is opgesteld voor macrofauna, maar lijkt ook op te gaan voor waterplanten (hogere planten en macro-algen tezamen).

In recente jaren zijn er reviews uitgevoerd, waarin de resultaten van verschillende studies naar zouttoleranties op soortengroepen zijn samengevat (Herbert *et al.*, 2015; afbeelding 5.1). Er zijn echter veel schijnbare tegenstrijdigheden in zouttoleranties tussen de gereviewde studies in Herbert *et al.* (2015). Als gevolg hiervan zijn resultaten vanuit het ene gebied moeilijk te vertalen naar een ander gebied. Dit komt, omdat naast het zoutgehalte zoals eerder uitgelegd andere factoren meespelen die de uiteindelijke zouttolerantie kunnen beïnvloeden. Denk bijvoorbeeld aan: het sulfaat- en calciumgehalte, trofieniveau, peilfluctuaties (wel of geen droogval), lichtbeschikbaarheid, de strijklengte van de wind en het klimaat. Daar komt bij dat de resultaten van de onderzoeken uit onder andere Herbert *et al.* (2015) zich vaak baseren op gemiddelde zoutgehalten. Hierdoor blijft de fluctuatie van het zoutgehalte onvoldoende belicht, terwijl juist deze fluctuaties bepalend zijn voor de zouttolerantie van soorten. Dit complexe samenspel van tal van factoren beïnvloedt de zouttolerantie van soorten en, daarmee samenhangend, de soortensamenstelling. Omdat dit samenspel vooralsnog onvoldoende is onderzocht, is het moeilijk gebleken om een bevredigende typologie van brakke wateren op te stellen.

AFBEELDING 4.1 GENERIEKE GRENZEN VOOR ZOULTOLERANTIE VAN ZOETWATER SOORTGEMEENSCHAPPEN. NEGATIEVE EFFECTEN DIE HIERIN ZIJN MEEGENOMEN, ZIJN EEN VERZAMELING VAN: BIOLOGISCHE ACTIVITEIT, GROOTTE, ABUNDANTIE, GROEISNELHEID EN REPRODUCTIE. DEZE GEGEVENS ZIJN GEBASEERD OP VELDMETINGEN, MESOCOSM STUDIES (DAT IS: GECONTROLEERDE VELDOPSTELLING) EN LABORATORIUM ONDERZOEK (HERBERT *ET AL.* 2015). TDS STAAT VOOR 'TOTAL DISSOLVED SOLIDS', OFTWEEL HET AANTAL OPGELOSTE VASTE STOFFEN



4.2.2 EFFECTEN OP SOORTENSAMENSTELLING

In deze paragraaf staan we in meer detail stil bij de effecten op de soortensamenstelling, met een focus op waterplanten en oersoorten. We bespreken de veranderingen die kunnen optreden in de soortensamenstelling in Nederlandse wateren bij een toenemend zoutgehalte, en vergelijken deze met de resultaten van experimenten en de situatie in het buitenland. Hierbij wordt onder andere gebruik gemaakt van veldgegevens uit Nederland over het voorkomen van waterplanten in relatie tot het zoutgehalte (bijlage I) en het ammoniumgehalte (bijlage II).

ZOULTOLERANTIE WATERPLANTEN

Het chloridegehalte van het water heeft een grote invloed op de soortensamenstelling in Nederlandse brakke wateren. Slechts weinig plantensoorten groeien exclusief in sterk brakke wateren (>3.000 mg Cl/l); alleen beide *Ruppia*-soorten komen hier voor. Vanuit de literatuur is bekend dat Brakwaterkransblad ook bij een chloridegehalte tot 5.000 mg Cl/l kan groeien (Corillion, 1957). In Nederland groeit deze soort echter voornamelijk bij lagere zoutgehaltes, wat waarschijnlijk het gevolg is van de voortgaande verzoeting van groeiplaatsen van deze soort.

Zwakke tot licht brakke wateren (300 - 3.000 mg Cl/l) hebben geen kenmerkende soorten die alleen in deze wateren groeien. Alle aangetroffen soorten groeien ook in een zoet milieu en bezitten een zekere tolerantie voor brak water. Kenmerkende soorten die zijn aangewezen in de KRW systematiek en goed scoren volgens de KRW-maatlatten zijn verschillende kranswier-soorten (zoals Ruw kransblad, Brokkelig kransblad), Groot nimfkruid, Glanzig fonteinkruid, Zilte waterranonkel en Fijn hoornblad (Altenburg *et al.*, 2018; Evers *et al.*, 2018), zie tabel 4.1). Bij een toenemend chloridegehalte daalt het aantal aangetroffen soorten geleidelijk. Dit geldt

met name voor het traject tussen 300 - 1.000 mg Cl/l. Vergelijkbare conclusies zijn getrokken door Runhaar *et al.* (1997), op basis van uitwerkingen van Nederlandse data door Barendregt (1993), Barendregt *et al.* (1990), Barendregt & Bootsma (1991) en De Lyon & Roelofs (1986).

TABEL 4.1 KARAKTERISTIEKE WATERPLANTENSOORTEN VOOR VERSCHILLENDE KRW-WATERTYPEN VAN BRAKKE WATEREN. CODE 1 EN 2 BETEKENEN RESP. ZEER GOED EN GOED SCOREND VOLGENS DE KRW-MAATLATTEN VAN DE BETREFFENDE WATERTYPEN (ALTENBURG *ET AL.*, 2018; EVERS *ET AL.*, 2018)

	KRW watertype	M1b	M30	M31
	chloridegehalte (mg/l)	150 - 1000	300-1000	1000-3000
taxon (wetenschappelijke naam)	taxon (nederlandse naam)			
alisma gramineum	smalle waterweegbree	2		
callitriche platycarpa	gewoon sterrenkroos	2		
chara	kransblad	1		
chara aspera	ruw kransblad		1	
chara baltica	kustkransblad		1	1
chara canescens	brakwaterkransblad		1	1
chara connivens	gebogen kransblad		1	1
chara globularis	breekbaar kransblad		2	2
chara hispida	stekelharig kransblad	1		
chara vulgaris	gewoon kransblad	1	2	2
equisetum fluviatile	holpijp	1		
najas marina	groot nimfkruid	1	1	
nitella opaca	donker glanswier		2	
potamogeton lucens	glanzig fonteinkruid	1		
potamogeton trichoides	haarfonteinkruid			
ranunculus baudotii	zilte waterranonkel	1	2	
ranunculus circinatus	stijve waterranonkel	2		
ruppia cirrhosa	spiraalruppia		1	1
ruppia maritima	snavelruppia		1	1
stratiotes aloides	krabbenscheer	2		
tolypella intricata	vertakt boomglanswier	1		
tolypella prolifera	groot boomglanswier	1		
utricularia vulgaris	gewoon blaasjeskruid	1		

Runhaar *et al.* (1997) stelden vast dat er grote verschillen waren in de gerapporteerde maximale zoutgehaltes waarbij een soort in de Nederlandse veldsituatie was aangetroffen. Ook de resultaten van experimenteel onderzoek naar de zouttolerantie van waterplanten wijken sterk af van de Nederlandse veldsituatie.

Als voorbeeld: voor soorten als Grof hoornblad, Gekroesd fonteinkruid en Tenger fonteinkruid, Grote kroosvaren en Veelwortelig kroos is experimenteel aangetoond dat deze een constante NaCl-concentratie tussen de 5 en 10 g NaCl/l kunnen tolereren (~ 2.700 – 5.500 mg Cl/l) en voor soorten als Doorgroeid fonteinkruid, Schedefonteinkruid, Aarvederkruid, Klein kroos en Bultkroos is een tolerantie gevonden tegen NaCl-concentraties tot 10 – 15 NaCl/l (~ 5500 - 8300 mg Cl/l; Moreira *et al.*, 2023). In Nederland komen deze soorten echter niet voor bij zulke hoge zoutgehaltes.

In het buitenland (bijvoorbeeld in de Oostzee) worden deze soorten bijvoorbeeld dan weer wel aangetroffen bij beduidend hogere zoutgehaltes dan in Nederland, al zijn de maximale chloridegehaltes wel lager (veelal tussen 1.000 – 1.500 mg Cl/l) dan in bovengenoemde experimentele studies. Het moge duidelijk zijn dat er voor dezelfde soorten dus forse verschillen

zijn gemeld in de literatuur en in het veld ten aanzien van zouttolerantie. Deze verschillen in zouttolerantie kunnen (deels) verklaard worden door: verschillen in de concentratie van sulfide, ammonium, fosfor (zie ook paragraaf 3.4 en 3.5) en verschillen in de stabiliteit van het zoutgehalte over de tijd en verschillen in zoutgehalte tussen het oppervlaktewater en de waterbodem (hieronder toegelicht).

Samenspel met sulfide- en ammoniumtoxiciteit

De chemische samenstelling van brakwater wijkt zoals in H3.4. toegelicht op verschillende punten af van die van zoet water, en dit is op verschillende manieren van invloed op de soortgemeenschappen in deze wateren. Brakwater bevat niet alleen hogere concentraties van natrium en chloride, maar ook van andere stoffen, zoals calcium, magnesium, kalium, en sulfaat. Sommige van deze stoffen zijn van grote invloed op biogeochemische processen in deze wateren. Als gevolg hiervan bezitten brakke wateren in Nederland een hogere beschikbaarheid van fosfor- en ammonium, en kunnen de concentraties van potentieel toxische stoffen (zoals sulfiden en ammoniak) tot hoge en mogelijk toxische waarden oplopen. Deze factoren werken niet alleen door op individuele soorten, maar beïnvloeden daarmee ook de structuur van het voedselweb en de regulering van het lichtklimaat. Het gaat hier om indirecte effecten.

Aangezien sulfide alleen in een (zuurstofloze) waterbodem wordt gevormd, is dit vooral giftig voor wortelende waterplanten (Lamers *et al.*, 2013). Sulfide kan zowel in zoete, brakke als zoute waterbodems gevormd worden indien er organisch stof en sulfaat aanwezig zijn en het zuurstofloos is. De gevoeligheid voor sulfide is wel soort-specifiek (onder andere Lamers *et al.*, 2013). Sommige waterplanten verlagen de sulfide- concentraties door de uitstoot van zuurstof in de wortelzone, waardoor het sulfide wordt geoxideerd (Lamers *et al.*, 2013). Deze aanpassing van een soort is met name effectief als een soort met een groot aantal individuen aanwezig is en verhoudingsgewijs een grote invloed heeft op de wortelzone. Hoge ammoniumconcentraties en de mogelijke vorming van ammoniaktoxiciteit speelt voornamelijk bij een pH- waarde hoger dan 8, omdat dan een aanzienlijk deel van het ammonium wordt omgezet in ammoniak. Dit proces speelt juist een grote rol in brakke wateren, omdat de pH van deze wateren van nature veelal hoger is dan in zoete wateren.

Stabiliteit zoutgehalte

De stabiliteit van het zoutgehalte tijdens het groeiseizoen speelt een grote rol voor de soortensamenstelling. In Nederlandse brakke wateren treden vaak grote fluctuaties in het zoutgehalte op. Geïsoleerde wateren kunnen in de loop van de zomer indampen, waardoor het zoutgehalte sterk oploopt. Daarnaast kan inlaat of kwel leiden tot jaarlijkse fluctuaties in zoutgehalte. De resulterende fluctuatie in zoutgehalte over het jaar heeft daarmee een sterk nivellerend effect op de soortenrijkdom van waterplanten; slechts een handjevol soorten (zoals Gesteelde zannichellia, Schedefonteinkruid, beide Ruppia-soorten) zijn hier namelijk tegen bestand. De grote fluctuaties in zoutgehalte in Nederlandse brakke wateren tijdens het groeiseizoen verklaren waarschijnlijk ook het verschil in zouttolerantie van soorten van Nederlandse standplaatsen in vergelijking met die in de Oostzee. In het laatstgenoemde systeem zijn de jaarlijkse fluctuaties in zoutgehalte namelijk veel kleiner dan in veel Nederlandse wateren. Oftewel, de omgeving is een stuk stabielere wat betreft het zoutgehalte. Dit maakt het aannemelijk dat veel zogeheten 'echte zoetwatersoorten' in Nederland om deze reden in de Oostzee tot beduidend hogere zoutgehaltes kunnen groeien (veelal tot 1.000 – 1.500 mg Cl/l).

Vershil zoutgehalte oppervlaktewater - waterbodem

Het verschil in zoutgehalte tussen het oppervlaktewater en de waterbodem kan een weerslag hebben op de groei van waterplanten. Experimenteel onderzoek met twee zouttolerante soorten (Smalle waterpest en Aarvederkruid) toont aan dat wortels en bovengrondse delen van deze soorten de hoogste biomassa bereiken wanneer de zoutconcentratie in het oppervlaktewater (~1.500 mg Cl/l) overeenkomt met die in de waterbodem (Velthuis *et al.*, 2023). Grote verschillen in zoutgehalte tussen het oppervlaktewater en de waterbodem leiden hoogstwaarschijnlijk tot fysiologische stress. Vermoedelijk kunnen deze soorten de verschillen in osmotische druk tussen wortels en bovengrondse delen moeilijk overbruggen wanneer het zoutgehalte tussen water en sediment sterk verschilt, waardoor groeiremming optreedt. Het is echter onbekend vanaf welke verschillen in zoutconcentratie tussen oppervlaktewater en waterbodem deze effecten optreden.

ZOUTTOLERANTIE OEVERSOORTEN

Net als bij waterplanten speelt het zoutgehalte van het water en de bodem een doorslaggevende rol voor emerse (in het water groeiende) helofyten. Bij chlorideconcentraties hoger dan 8.000 mg Cl/l komen geen helofyten meer tot ontwikkeling. De soorten Heen, Riet en Ruwe bies zijn het best bestand tegen zoute condities, gevolgd door Mattenbies, Gele lis en Oeverzegge. Het minst zouttolerant zijn soorten als Kleine lisdodde, Grote lisdodde, Liesgras, Zwanenbloem en Grote egelskop; de bovengrens van laatstgenoemde vijf soorten ligt op circa 1.000 mg Cl/l in het oppervlaktewater. Deze rangorde komt goed overeen met bevindingen in de literatuur. Dit geldt zowel voor volwassen planten (ter Heerdt, 1995; Hootsmans, 1996; Tosserams *et al.*, 1997) als voor de kieming van zaden (Kerkum *et al.*, 1996; Hootsmans & Wiegman, 1998).

Bovengenoemde grenzen gelden ook voor helofyten die vanuit de waterkant naar hoger gelegen terrestrische oevers groeien. Door verdamping kan het chloridegehalte in de bovenste bodemlaag van deze oevers sterk stijgen, met name tijdens droge periodes in de zomer. Hierbij kan het zoutgehalte zo sterk toenemen dat de vegetatie gedomineerd gaat worden door zouttolerante plantensoorten. Bij een chloridegehalte in het porievocht dat hoger is dan 15.000 mg Cl/l, overheerst Zeekraal (Tosserams *et al.*, 1997). Wanneer het chloridegehalte afneemt, wordt Zulte dominant. Bij concentraties rond 10.000 mg Cl/l kunnen soorten als Heen en Riet zich vestigen. Verdere uitbreiding van Heen en Riet treedt echter pas op bij lagere zoutgehaltes (Tosserams *et al.*, 1997). Bij verdere daling van het zoutgehalte zullen biezen en tenslotte ook de meest zoutgevoelige soorten als Lisdodde zich kunnen vestigen. Soortenrijke vegetaties van helofyten worden pas verwacht wanneer het zoutgehalte van de doorwortelde bodemlaag lager is dan 1.000 mg Cl/l.

4.2.3 EFFECTEN OP ECOLOGISCH FUNCTIONEREN VAN HET VOEDSELWEB

De invloed van zout water beïnvloedt niet alleen het voorkomen van individuele soorten, maar verandert ook de structuur van het voedselweb. Met name in Denemarken is veel onderzoek verricht naar de gecombineerde effecten van een toenemend zoutgehalte en trofieniveau op het voedselweb in brakke wateren (Jeppesen *et al.*, 1994; 2007). Deze resultaten komen overeen met die van brakke wateren in Nederland. Bij een chloridegehalte boven 1.100 – 1.400 mg Cl/l worden grote watervlooien (zoals *Daphnia*) vervangen door kleine zoöplanktonsoorten (zoals *Bosmina*, calanoïde Copepoden en Rotiferen) (Van Geest *et al.*, 2022).

Deze verschuiving in zoöplanktensamenstelling heeft grote gevolgen voor de helderheid van het water. *Daphnia*'s zijn namelijk in staat om de biomassa van algen laag te houden, ook als de algen snel groeien. Bij hogere zoutgehaltes domineren weliswaar copepoden en radardiertjes, maar zij zijn minder efficiënte grazers, waardoor de algenbiomassa sterk kan toenemen. Wanneer de *Daphnia*'s verdwijnen, dan vermindert of verdwijnt dus de 'top-down' controle op de algenbiomassa en kan het water eerder troebel worden. Het belangrijkste gevolg is dat – bij een toenemend zoutgehalte en gelijkblijvende nutriëntenbelasting – helder water kan omslaan naar troebel water boven waarden van 1.100 – 1.400 mg Cl/l.

De drempelwaarde voor deze soortverschuiving heeft geen vaste waarde en hangt af van onder andere het trofieniveau van het watersysteem. Voedselrijker water resulteert namelijk in hogere dichtheden van vissen en aasgarnalen (Jeppesen *et al.*, 1994), waardoor er een hogere predatiedruk is op *Daphnia*'s. Dit resulteert in een lagere drempelwaarde voor chloride en daarmee een snellere omslag naar troebel water. Voor eutrofe brakke wateren in Denemarken ligt deze drempelwaarde rond 1.100 mg Cl/l (Jeppesen *et al.*, 1994; 2007). Deze waarde komt goed overeen met de bovengrens van *Daphnia* in Nederlandse (eutrofe) brakke wateren, die in het bereik van 1.000 – 1.400 mg Cl/l ligt. Deze drempelwaarde is relatief laag, en is het gevolg van een hoge visbiomassa in Deense en Nederlandse brakke wateren. Wanneer de visbiomassa lager is, dan is er minder vispredatie en kan *Daphnia* bij hogere zoutgehaltes voorkomen.

Dit geldt met name voor *Daphnia magna*, die zoutconcentraties tolereert tot circa 3.700 mg Cl/l. Deze soort is - vanwege zijn forse formaat – echter sterk gevoelig voor vispredatie, waardoor deze soort nauwelijks een rol van betekenis speelt in eutrofe brakke wateren (Jeppesen *et al.*, 1994).

4.2.4 VISSSEN

Zoet-zout dynamiek werkt op verschillende manieren door op het KRW kwaliteitselement 'vis'. Hierbij is het zaak een onderscheid te maken tussen grofweg twee typen vissoorten. Ten eerste zijn er veel trekvissoorten die gebieden met een verschillend zoutgehalte gebruiken om te paaien, foerageren, op te groeien en te overwinteren. Dergelijke trekvis stelt eisen aan onder andere hoe zoete en zoute wateren met elkaar verbonden zijn. Enkele voorbeelden zijn: Glasaal, Driedoornige stekelbaars, Spiering, Atlantische zalm, Zeeforel en Zeeprik. Ten tweede zijn er vissoorten die hun hele leven doorbrengen in wateren met een redelijk constant zoutgehalte. Enkele voorbeelden in zoete wateren zijn: Baars, Blankvoorn, Brasem, Pos en Snoekbaars. Voorbeelden van estuariene residenten zijn onder andere Brakwatergrondel, Dikkopje en Puitaal, met de kanttekening dat met name Brakwatergrondel grote verschillen in temperatuur en zoutgehalte aan kan.

Hier lichten we kort toe welke eisen trekvis en residenten stellen aan hun leefomgeving in het kader van zoet-zout dynamiek en welke effecten kunnen optreden bij verzilting of verzoeting.

TREKVISSEN

Eisen in het kader van zoet-zout dynamiek

In het kader van de zoet-zout dynamiek stellen trekvisen twee belangrijke eisen aan hun leefomgeving:

- de wateren waar de vis naartoe wil zwemmen, dienen vindbaar en bereikbaar te zijn, en;
- voor sommige soorten geldt de aanvullende eis dat er een geleidelijke zoet-zout gradiënt is voor acclimatisatie aan een dalend zoutgehalte.

Trekvisen stellen ook eisen aan bijvoorbeeld de watertemperatuur, de stroomsnelheid en de waterdiepte, maar die worden hier niet verder toegelicht. Voor een volledig beeld van de alle leefomgevingseisen kan de lezer terecht bij de kennisdocumenten van Sportvisserij Nederland.

Het vindbaar en bereikbaar maken van zoete en zoute wateren vereist voor optrekkende vis een zoetwaterlokstroom en een vispassage of open verbinding. Een zoetwaterlokstroom helpt mee aan het creëren of herstellen van een zoet-zout gradiënt. Dit lokt de trekvis naar de juiste ingang. Een open verbinding geniet de voorkeur, maar dit maakt verzilting van binnendijkse wateren minder goed controleerbaar. Daarom zijn de meeste verbindingen van zout of brak buitenwater naar brak of zoet binnenwater geregeld met technische vispassages. Met name de kleine zwakke zwemmers (bijvoorbeeld: Glasaal, Driedoornige Stekelbaars, Spiering) maken van deze vispassages gebruik om de Nederlandse binnenwateren op te trekken. Omdat de sterke zwemmers onder de trekvisen (nl.: zalmachtigen) voornamelijk via de grote rivieren trekken en niet de binnenwateren optrekken, ligt de focus voor de binnenwateren alleen op de kleine zwakke zwemmers.

De volgende zwakke zwemmers worden hier onderscheiden: juveniele Bot, Driedoornige stekelbaars, Glasaal (Aal/Paling) en Spiering. Van deze soorten is acclimatisatie aan het zoutgehalte noodzakelijk voor juveniele Bot. Bot kan namelijk huidzweren ontwikkelen bij grote verschillen in zoutgehalte (Vethaak, 2013; Winter *et al.*, 2014).

Voor Glasaal (Paling) is acclimatisatie wenselijk, voor Spiering is het mogelijk van belang en voor Driedoornige stekelbaars is acclimatisatie niet van groot belang (Peake, 2008; Vethaak, 2013; Griffioen en Winter, 2014; Winter *et al.*, 2014; Witteveen+Bos, 2009)⁶. Voor de zwakke zwemmers gezamenlijk is er dus een belang om een zoet-zout overgang vast te houden die lang en groot genoeg is om te voorkomen dat de brakwaterzone tijdelijk geheel verzoet of verzilt. Daarnaast dient de gradiënt van zoet naar zout minimaal 2,5 km, maar bij voorkeur langer dan 4,5 km te zijn met voldoende rustplekken, zodat trekvis voldoende kan rusten en acclimatiseren.

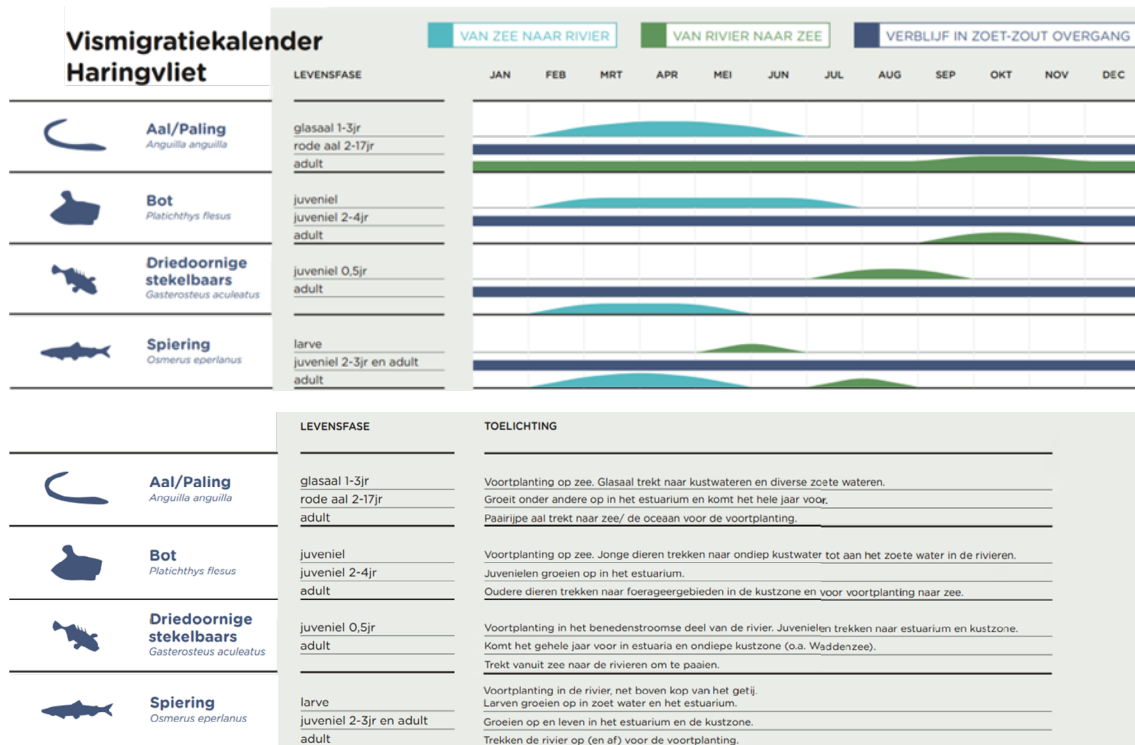
Effecten van (handelen op) zoet-zout dynamiek

Zoet-zout dynamiek kan ertoe leiden dat de vispassages worden gesloten, bijvoorbeeld om zoet water langer vast te houden. Dit kan negatieve gevolgen hebben op vismigratie en de visstand in latere jaren, met name als dit gebeurt in de algemene in- en uittrekperiodes (afbeelding 4.2). De kritische periode waarin de meeste intrek plaats vindt, is in de maanden februari tot en met juli. Een sluiting van langer dan drie weken kan leiden tot aanzienlijk negatieve effecten. De reden hiervoor is dat trekvis tot ongeveer 3 weken na het wegvallen van een zoetwaterlokstroom aan de bodem kan 'ruiken' dat er vroeger een zoetwater-

⁶ Voor Aal en Spiering is meer onderzoek nodig om definitief vast te stellen in hoeverre een geleidelijke zoet-zout gradiënt nodig is. Deze soorten maken thans ook al zonder aanzienlijk negatieve effecten gebruik van vispassages op zoet-zout overgangen met een (zeer) korte zoet-zout gradiënt (bijv.: Polder Breebaart, Stevin spuicomples Den Oever).

lokstroom is geweest (*pers. comm.* M. Klinge). Uiteraard geldt dat een tijdelijke stop van een zoetwaterlokstroom zoveel mogelijk dient te worden voorkomen en de vispassages zoveel mogelijk open zijn. Om onafhankelijk te zijn van weerseffecten op vismigratie en ook andere soorten vis (bijvoorbeeld: zomergasten) te bedienen, is de zoetwaterlokstroom idealiter jaarrond aanwezig.

AFBEELDING 4.2 VISMIGRATIEKALENDER VAN ZWAKKE ZWEMMERS DIE NAAR NEDERLANDSE BINNENWATEREN TREKKEN. DE VISMIGRATIEKALENDER IS OPGESTELD DOOR B. REEZE (BUREAU STROMING), M. KROES (KROES CONSULTANCY), W. VAN EMMERIK (SPORTVISSERIJ NEDERLAND) EN J. QUAK (SPORTVISSERIJ NEDERLAND) OP BASIS VAN HISTORISCHE EN BIOLOGISCHE GEGEVENS. (BRON: EMMERIK, 2016)



Een ander gevolg van zoet-zout dynamiek kan zijn dat de zoet-zout overgang stroomopwaarts trekt door een tekort aan zoet water tijdens droge perioden. Dit is in zekere zin een natuurlijk proces. Onder natuurlijke omstandigheden verschuift een zoet-zout gradiënt in de winter en voorlente stroomafwaarts door een hoge rivierafvoer en in de zomer en herfst stroomopwaarts door een lage rivierafvoer. Hoewel het stroomopwaarts trekken van de zoet-zout overgang nadelig kan zijn voor onderwatervegetatie, die hierdoor te maken krijgt met verzilting, is deze verschuiving niet per sé nadelig voor trekvis. Nadelige effecten voor trekvis kunnen echter wel optreden als door een tekort aan zoet water de zoet-zout overgang korter wordt (bijvoorbeeld door beheerkeuzes). Hierdoor neemt namelijk de kans op stress toe bij optrekkende vissoorten die een belang hebben aan acclimatisatie aan een lager wordend zoutgehalte.

RESIDENTEN

Eisen in het kader van zoet-zout dynamiek

In het kader van de zoet-zout dynamiek stellen residenten vissen de volgende eisen aan hun leefomgeving:

- het zoutgehalte in het verblijfwater blijft binnen het bereik dat de vissoort aan kan, en;
- als het zoutgehalte toch buiten het bereik komt dat de vissoort aankan, dienen andere wateren met een gunstiger zoutgehalte vindbaar en bereikbaar te zijn.

Zoetwatervis zal pas bij een toename van het zoutgehalte met grosso modo 1 g Cl/l opmerken dat z'n omgeving zouter is geworden en trachten weg te zwemmen (*pers. comm. M. Klinge*). Vissen zijn ook gevoelig voor fluctuaties in het zoutgehalte; duidelijke grenswaarden zijn echter niet bekend en zijn derhalve een kennislacune.

Effecten van (handelen op) zoet-zout dynamiek

Voor alle soorten vis geldt het principe dat er de mogelijkheid moet zijn om naar een ander water te kunnen zwemmen (1) als de vissoort vanwege trekgedrag op zoek is naar zouter of zoeter water dan in het verblijfwater of (2) als het zoutgehalte in het verblijfwater door (ongewenste) zoet-zout dynamiek buiten het bereik komt van wat de vissoort aankan.

In termen van beheer kan onder andere het lozen van zout water in gestratificeerde wateren ertoe leiden dat zoetwatervis aan de oppervlakte onbedoeld uitspoelt. En als een geïsoleerd obligaat zoet systeem zout water ontvangt via natuurlijke of kunstmatige wegen, heeft vis geen tot weinig uitvalswegen. Door het oplopend zoutgehalte kan vis hierdoor stress ervaren en zelfs sterven.

Waar zoetwatervis (en trekvis) mogelijk kan wegzwemmen bij een stijgend zoutgehalte, kunnen viseieren en larven zich niet of nauwelijks verplaatsen. Hierdoor zijn met name de jongste levensfasen vis het meest kwetsbaar voor de effecten van zoet-zout dynamiek. Als verzilting meerdere opeenvolgende keren tijdens deze kwetsbare fase optreedt, kan dit nadelige gevolgen hebben voor het in stand houden van populaties.

4.3 STELREGELS OP BASIS VAN DE EIGENSCHAPPEN VAN EEN ZOUTPULS

In voorgaande paragraaf is toegelicht dat de effecten van zout veroorzaakt kunnen worden door verschillen in het zoutgehalte. Deze effecten kunnen samengaan met interne eutrofiëring (door verhoogde concentraties van sulfaat en ammonium) en de vorming van potentieel toxische stoffen (zoals sulfiden en ammoniak). In hoeverre deze effecten daadwerkelijk optreden, is afhankelijk van onder andere de ontstaansgeschiedenis van het gebied (namelijk: is de waterbodem gevormd onder zoete of brak/zoute omstandigheden?) en de eigenschappen van de zoutpuls.

De zoutpuls (anders dan een chronische zoutbelasting) kan op verschillende manieren van invloed zijn op de soortensamenstelling en het ecologisch functioneren van een watersysteem. Hierbij is het zaak een onderscheid te maken tussen de volgende eigenschappen:

- het tijdstip waarop de zoutpuls optreedt (bijvoorbeeld: voorjaar (kieming en zaailingfase), zomer (groeifase) of winterhalfjaar);
- de intensiteit van de zoutpuls (de maximum concentratie);
- de tijdsduur van de zoutpuls;

- de frequentie en het tijdsinterval tussen opeenvolgende zoutpulsen (namelijk: relevant in verband met de benodigde tijd voor ecologisch herstel als gevolg van eerdere zoutpulsen);
- de omvang in termen van gebiedsgrootte (bijvoorbeeld: 1 sloot versus een gehele polder? Dit is ook relevant voor kans op herkolonisatie en ecologisch herstel).

Deze eigenschappen van een zoutpuls hebben onderling een sterke interactie. Zoutpuls treden vaker op in de zomer als er door hitte en droogte minder zoetwater beschikbaar is en verdamping groter is. Zulke weersomstandigheden maken tevens de kans op een hogere frequentie, hogere intensiteit en een grotere omvang groter. Hierbij is wel een duidelijk patroon herkenbaar in doorwerking op soorten: een zoutpuls zal vrijwel direct leiden tot osmotische stress, terwijl interne eutrofiëring (door sulfaat en ammonium) en toxiciteit (sulfide, ammoniak) pas na beduidend langere tijd (enkele weken) optreedt. Waarschijnlijk zijn de ecologische effecten ook sterk afhankelijk van het tijdstip waarop de zoutpuls optreedt; naar verwachting zijn de effecten in het voorjaar beduidend sterker dan in de zomer en winter, aangezien het begin van het groeiseizoen zeer bepalend is bij onstabiele systemen (fluctuerend tussen verschillende ecosysteemtoestanden, vb, helder waterplantenrijk vs troebel algenrijk water) welke eindtoestand behaalt gaat worden. Dit is echter een kennislacune.

Voor implementatie in het afwegingskader kiezen we een pragmatische aanpak te volgen. In vrijwel alle Nederlandse wateren gaat een stijgend zoutgehalte gepaard met hogere concentraties van fosfor, ammonium, ammoniak, sulfaat en sulfiden in het oppervlaktewater en/of sediment (afbeelding 3.17). Bovendien gaat een stijgend zoutgehalte vaak ook samen met grotere fluctuaties in de tijd, zeker bij relatief kleine, ondiepe regionale wateren. Dit betekent dat de effecten van grotere zoutfluctuaties, externe toevoer van nutriënten, interne eutrofiëring, en toxiciteit van sulfiden en ammoniak veelal gelijktijdig optreden. Tot slot wordt aangenomen dat de ecologische effecten in het voorjaar (start van het groeiseizoen; kieming en vestiging van waterplanten) groter zijn dan de effecten in de zomer en winter. Samenvattend leidt dit tot de volgende aannames:

- hogere zoutgehalten zijn in Nederland geassocieerd met grotere fluctuaties in zoutgehalte;
- hogere zoutgehalten gaan gepaard met hogere concentraties van ammonium en fosfor in oppervlaktewater en sediment;
- hogere zoutgehalten gaan in Nederland gepaard met hogere concentraties van ammoniak (in het oppervlaktewater) en sulfiden (in het sediment);
- In het voorjaar hebben hogere zoutgehalten een sterker ecologisch effect dan in de zomer en winter.

4.4 GRENSWAARDEN VOOR VERZILTING

Voor het beschrijven van de effecten van verzilting op de aquatische natuur wordt onderscheid gemaakt tussen de drie zoutsituaties (paragraaf 2.3.5): wateren die oorspronkelijk en nog steeds zoet zijn (zoete wateren); wateren met een bodem die onder brakke omstandigheden is gevormd, maar waarvan het oppervlaktewater thans zoet is (voormalig brakke en verzoete wateren) en; permanent brakke wateren (brakke wateren).

In tabel 4.2 is aangegeven hoe de KRW-doeltypen en N2000 habitattypen binnen deze klassen worden ondergebracht, gebruik makend van de ontstaansgeschiedenis, het bodemtype en het huidige chloridegehalte.

TABEL 4.2 INDELING VAN DE KRW-DOELTYPEN EN RELEVANTE N2000 (BINNEN DE SCOPE) NAAR ONTSTAANSGESCHIEDENIS, BODEMTYPE EN HUIDIG CHLORIDEGEHALTE

Ontstaansgeschiedenis		Bodemtype	Huidige Cl gehalte (mg Cl/l)	KRW doeltype	N2000 type
Vroeger	Nu				
zoet	zoet	veen	<300	alle niet-brakke KRW-typen (m.u.v. M1b, M30, M32 en wateren die als M1a zijn gekenmerkt) worden alleen meegenomen als er geen (maandelijkse, wekelijkse) overschrijdingen zijn van 300 mg Cl/l; alle niet KRW-typen die geen incidentele zoutpulsen hebben	meren met krabbescheer en fonteinkruiden kranswierwateren (in zoete wateren)
		zand, klei	<300		
brak	verzoet	veen, zand, klei	300 - 1.000 mg cl/l, geen zoutpieken boven 1.000 mg cl/l	M1b, M1a (met incidentele zoutpulsen); alle niet KRW-typen die wel incidentele zoutpulsen hebben	
brak	verzoet	veen, zand, klei	300 - 1.000 mg cl/l, mét zoutpieken boven 1.000 mg cl/l	M30	
brak	brak	veen, zand, klei	1.000 - 3.000 mg cl/l	M31, M32	
brak	brak	veen, zand, klei	>10.000 mg cl/l	M31, M32	

4.4.1 ZOETE WATEREN

De effecten van verzilting zijn het grootst in wateren die sinds het ontstaan reeds zoet zijn (chloridegehalte altijd lager dan 300 mg Cl/l). De organismen in zoete wateren zijn niet aangepast aan brakke of zoute condities en zullen dan ook op korte termijn sterk negatief beïnvloed worden door verzilting. Ook de biogeochemische consequenties van verzilting in zoete systemen kunnen groot zijn. Tevens kan (korte termijn) verzilting van het oppervlaktewater langdurige consequenties hebben **OP** de waterbodem en de hierin aanwezige processen. Vaak kan de bodem zich op korter termijn al opladen met ionen en sulfaat en kan een korte zoutpuls hiermee langdurige consequenties hebben. Bij verzilting van zoete systemen zullen, afhankelijk van de aard van verzilting (intensiteit, frequentie, duur, omvang en tijdstip), de aanwezige organismen stress van ondervinden. Hierbij geldt: hoe gevoeliger het organisme, hoe sneller er een negatief effect op zal treden.

Naast directe effecten op organismen kan ook het functioneren van het voedselweb veranderen als gevolg van de effecten van verzilting op specifieke trofische niveaus (bijvoorbeeld: het verdwijnen van Daphnia's); deze veranderingen treden op als het zoutgehalte hoger is dan circa 1.100 mg Cl/l.

Naast de korte termijn effecten op organismen kan verzilting van zoete systemen leiden tot eutrofiëring door een mobilisatie van ammonium door kationmobilisatie en mobilisatie van fosfor als gevolg van sulfaatreductie. Op iets langere termijn kan de combinatie van deze processen tot meer reductieve waterbodems leiden en een toename van toxische stoffen zoals sulfide en ammonia. De risico's op eutrofiëring en de vorming van toxische stoffen is vele malen groter in (zoete) wateren die rijk zijn aan organisch stof en nutriënten dan in zoete wateren arm in organisch stof en nutriënten.

Voor waterplanten in zoete wateren zijn de volgende grenswaarden van chloride van belang:

- chloridegehalte >300 mg Cl/l: diverse waterplanten verdwijnen;
- chloridegehalte >1.000 mg Cl/l; het merendeel van kenmerkende zoetwatersoorten is verdwenen; bovendien verdwijnt Daphnia vanaf circa 1.100 mg Cl/l;
- chloridegehalte >3.000 mg Cl/l: zoetwatersoorten zijn geheel verdwenen; merendeel van ondergedoken vegetatie verdwijnt;

- chloridegehalte >10.000 mg Cl/l: brakwatersoorten nemen ook duidelijk af, met name wanneer deze grenswaarde in het voorjaar wordt overschreden.

4.4.2 VOORMALIG BRAKKE EN VERZOETE WATEREN

De effecten van verzilting zijn kleiner op voormalig brakke en verzoete wateren in vergelijking met van origine zoete wateren. In grote lijnen zijn de processen vergelijkbaar met verzilting van zoete wateren alleen zijn de effecten minder groot. Het verschil zit hem er vooral in dat voormalig brakke en verzoete wateren vaak nog gekenmerkt worden door hogere zout en sulfaatconcentraties in de waterbodem én, mede als gevolg hiervan, een lagere dichtheid aan soorten welke gevoelig zijn voor verhoogde zout dan wel sulfaatconcentraties.

Dit leidt ertoe dat bij een verzilting met lage zoutconcentraties er weinig effecten te verwachten zijn in voormalig brakke en verzoete wateren omdat de erg gevoelige soorten hier ontbreken. Biogeochemisch zijn de effecten van verzilting in voormalig brakke en verzoete wateren ook kleiner dan in zoete wateren. Vaak bevatte de waterbodem hier reeds iets verhoogde zout en sulfaatconcentraties en leidt een verhoging van zoutconcentraties en sulfaatconcentraties tot minder grote effecten omdat er al weinig ammonium aan het bodemadsorptiecomplex gebonden zit en het merendeel van ijzer reeds aan zwavel gebonden zit en er dus verhoudingsgewijs weinig fosfaat extra gemobiliseerd kan worden. Uiteraard zijn deze processen sterk afhankelijk van locatie specifieke eigenschappen, een systeem dat reeds ruim een eeuw verzoet is, reageert sterker op verzilting dan een systeem dat slechts enkele decennia of jaren verzoet is. Tevens moet hierbij vermeld worden dat een groot aandeel van de voormalig brakke wateren vaak ook eutroof zijn. Dit kan soms een even groot of zelfs groter dilemma vormen voor het aquatische ecosysteem dan veranderende zoutconcentraties. Kleinere veranderingen in de beschikbaarheid van nutriënten als gevolg van verzilting kunnen in het niet vallen bij een eutrofe achtergrond.

4.4.3 BRAKKE WATEREN

Verzilting van brakke wateren heeft logischerwijs in vergelijking met zoete en voormalig brakke wateren de kleinste effecten. Brakke wateren worden gekenmerkt door verhoogde en fluctuerende zoutconcentraties. Enkel indien brakke wateren langdurig door zeewater ofwel indamping beïnvloed worden, zou er gesproken kunnen worden van verzilting van brakke wateren. Op dat moment verliezen brakke wateren hun brakke karakter met verzilting en veranderen deze in saline, dan wel hypersaline systemen. Dit zal dan ook ten koste gaan van de brakke natuurwaarde.

4.5 GRENSWAARDES VOOR VERZOETING

Verzoeting heeft uiteraard alleen effect op licht tot sterk brakke systemen. Brakke systemen zijn vaak gekenmerkt door aanzienlijke fluctuaties in zoutgehalte. Om deze reden hebben kortdurende lagere zoutgehaltes weinig effect op de soortensamenstelling en ecologisch functioneren van deze systemen. Deze wateren zijn vooral gevoelig voor langdurige verzoeting, met name tijdens het groeiseizoen. Veel brakwatersoorten kunnen in zoet water groeien. Hier komen ze echter in de praktijk niet of nauwelijks voor, omdat ze worden weggeconcentreerd door zoetwatersoorten die bijvoorbeeld sneller groeien en algeheel beter zijn ingesteld op groeien in een zoet milieu. Langdurige verzoeting vergroot dus de kans dat brakwatersoorten worden weggeconcentreerd door zoetwatersoorten, korte zoetwaterpulsen hebben naar verwachting weinig effect.

De volgende grenswaarden zijn hierbij van belang:

- echte brakwatersoorten zijn beperkt tot wateren met een chloridegehalte boven 1.000 mg Cl/l;
- wanneer brakke wateren met een chloridegehalte boven 1.000 mg Cl/l langdurig worden blootgesteld aan zoet(er) water, dan vergroot dit de kans op de vestiging van zoetwatersoorten (en het verdwijnen van brakwatersoorten);
- langdurige blootstelling van zwak brakke wateren (300 – 1.000 mg Cl/l) aan zoet water (<300 mg Cl/l) heeft nauwelijks of geen negatieve effecten. In theorie kan er dan zelfs een kwaliteitsverbetering optreden (bij permanent lagere zoutgehaltes);
- blootstelling aan zoet(er) water tijdens het winterhalfjaar heeft op de vegetatie niet of nauwelijks effect, maar mogelijk wel op macrofauna en vis. Veel brakke wateren zijn van nature ook zoeter in het winterhalfjaar door het neerslagoverschot.

4.6 HERSTELTIJD

Er is te weinig kennis beschikbaar over de hersteltijd van organismen en ecosystemen na verzilting dan wel verzoeting om hier concrete uitspraken over te doen. Wel is er de werkhypothese dat zoete systemen veel gevoeliger zijn voor verzilting dan brakke systemen dat zijn voor verzoeting.

Het is daarom aannemelijk dat de hersteltijd van een zoet systeem, blootgesteld aan verzilting, veel langer is dan een brak systeem dat bloot wordt gesteld aan verzoeting. Brakke wateren worden immers gekenmerkt door fluctuerende zoutgehalte in ruimte en tijd en zijn meer zoet-zout dynamiek gewend. De soorten die voorkomen in brakke systemen, zijn hierop gespecialiseerd.

Daarnaast is het ook zaak om de 'hersteltijd' op te delen in een abiotische hersteltijd en een biotische of ecologische hersteltijd. Onder de abiotische hersteltijd kan verstaan worden dat dit het tijdbestek betreft waarna de abiotische condities weer hersteld zijn naar de oorspronkelijke condities voorafgaand aan de verandering in het zoutgehalte. De biotische ofwel ecologische hersteltijd betreft dan de tijdsperiode waarin weer terug keren en soortengemeenschappen zich weer herstellen na een verandering in het zoutgehalte.

Over de abiotische hersteltijd is wel het een en ander bekend. Zo weten we bijvoorbeeld dat waterbodems sneller verzilten dan dat ze verzoeten (onder andere Van Dijk et al. 2015, Van Geest et al. 2022) en voor verschillende processen zijn hier grofweg inschattingen te maken of het om weken tot maanden en jaren gaat. De abiotische hersteltijd van het oppervlaktewater zelf is vrij snel. Hierbij moet in weken ofwel maanden gedacht worden. De waterbodem reageert en herstelt echter trager. De abiotische hersteltijd voor zout in de waterbodem zal na een korte zoutpuls in termijnen van maanden tot jaren liggen (afhankelijk ook van de duur en intensiteit van de zoutpuls en bodemeigenschappen). De abiotische hersteltijd van indirecte biogeochemische effecten van een zoutpuls (denk aan oplading van de bodem met sulfaat, mobilisatie van elementen et cetera) is eerder een periode van jaren.

Over de ecologische hersteltijd is erg weinig bekend. De ecologische hersteltijd is niet alleen afhankelijk van de zoutpuls, maar ook van andere stressoren die op het systeem inwerken, zoals eutrofiering en toxiciteit van gewasbeschermingsmiddelen. Daarnaast hangt de ecologische hersteltijd ook van de schaal en duur van de zoutpuls en of soorten het gebied weer kunnen koloniseren, of de zaadbank nog vitaal is etc. In veel Nederlandse brakke wateren

zijn veel gevoelige soorten reeds verdwenen, waardoor een zoutpuls een minder negatief effect heeft. Vanuit het oogpunt van potentie voor ecologisch herstel zijn sterk aangetaste wateren echter juist gevoeliger voor een zoutwaterpuls, omdat dit het ecologisch herstel nog verder frustreert.

4.7 KENNISHIATEN EN BENODIGD ONDERZOEK

De volgende kennishiaten zijn geconstateerd en dienen geadresseerd te worden.

Belang ontstaansgeschiedenis voor afbraak organisch materiaal tijdens verzilting

De mate waarin sulfaatreductie een rol speelt na verzilting wordt ook beïnvloed door de beschikbaarheid van gemakkelijk afbreekbaar (reactief) organisch materiaal. In welke mate verzilting de afbraak van organisch stof stimuleert of juist remt, is sterk afhankelijk van de uitgangssituatie en betreft deels nog een kennislacune. Er zijn namelijk studies die zowel een afname als een toename van de afbraak van organisch materiaal laten zien na verzilting (Herbert *et al.*, 2015). Een lagere afbraak kan het gevolg zijn van osmotische stress voor micro-organismen die voor deze afbraak verantwoordelijk zijn. Een toegenomen beschikbaarheid van sulfaat kan de afbraak juist weer stimuleren. Dit geldt vooral voor bodems die rijk aan organische stof zijn, zoals veenbodems en organisch rijke slibbodems.

In deze bodems is de invloed van sulfaat op de toename van de fosforbeschikbaarheid vele malen groter dan in bodems met een laag organisch stofgehalte. Wanneer er geen reactief organisch materiaal aanwezig is, dan kan er geen sulfaatreductie en sulfidevorming optreden omdat sulfaatreductie dan gelimiteerd wordt door een gebrek aan organisch materiaal.

Uiteraard speelt de nutriëntenrijkdom van de bodem ook een belangrijke rol. Immers, hoe meer nutriënten er in een bodem opgeslagen liggen, hoe groter de potentiële effecten van verzilting kunnen zijn. Dit geldt niet alleen voor de oorspronkelijke bodem, maar ook voor de bovenliggende sliblaag. Juist deze sliblaag bestaat in veel Nederlandse wateren uit gemakkelijk afbreekbaar, nutriëntenrijk organisch materiaal dat afkomstig is van omliggende landbouwpercelen, of van afgestorven algen- en plantenmateriaal. En juist de sliblaag komt als eerste in aanraking met verhoogde zoutconcentraties tijdens verzilting. Hier is meer wetenschappelijk onderzoek voor nodig, zeker in relatie tot zoutpulsen, zout fluctuaties en de hersteltijd.

Effecten van fluctuaties in zoutgehalte.

Uit dit onderzoek komt naar voren dat de inzichten in ecologische effecten van 'gemiddelde' zoutgehaltes redelijk bekend zijn, maar dat de effecten van fluctuaties en tijdelijke piekconcentraties nog slecht in beeld zijn gebracht. Uit de literatuur blijkt dat deze fluctuaties van grote invloed zijn op de ecologische kwaliteit van brakke wateren. Hier is wetenschappelijk onderzoek voor nodig.

Effecten van eutrofiëring en onnatuurlijk zoutregime moeilijk te scheiden

Veel Nederlandse zwak brakke wateren worden gekenmerkt door een onnatuurlijk zoutregime (hoge fluctuaties en actief verlaagde zoutgehaltes in het zomerhalfjaar door actieve doorspoeling met zoet(er) water); Tegelijkertijd is het overgrote merendeel van deze wateren zeer eutroof. Door de sterke overlap van de factoren eutrofie en zoutfluctuaties zijn de effecten hiervan niet goed van elkaar te scheiden.

In brakker water komen bovendien ook andere stoffen in hogere concentraties voor, zoals sulfiden, ammonium en ammoniak. Inzicht in de effecten van de combinaties van deze factoren (multi-stress) is nodig om de kennis over het ecologisch functioneren te vergroten en daarmee behoud en ecologisch herstel van brakwatergemeenschappen in Nederland. Hiervoor is nader (experimenteel) onderzoek noodzakelijk. Met behulp van dergelijk onderzoek kunnen causale verbanden inzichtelijk worden gemaakt, doordat de effecten van verschillende factoren individueel onderzocht kunnen worden;

Zoet-zout dynamiek i.r.t. verblijftijd

Meer inzicht in de effecten van zout- en nutriëntfluxen (bijvoorbeeld met behulp van water- en stofbalansen) in relatie tot de verblijftijd van het oppervlaktewater in verschillende brakwaterecosystemen kan aanvullende inzichten geven in de wijze waarop systemen functioneren. Dit is ook nodig om beter te kunnen bepalen wat het effect van de verblijftijd op de hersteltijd is.

Connectiviteit brakke wateren

De rol van connectiviteit tussen brakke wateren en hun omgeving is in het voorliggende onderzoek niet onderzocht. Wel is bekend dat binnendijks gelegen brakke wateren vaak sterk geïsoleerd en klein zijn, terwijl natuurlijke brakke wateren juist vaak gekenmerkt worden door een open karakter en vaak van grotere omvang zijn en ook een gradiënt in de ruimte kenmerken in plaats van alleen sterke wisselingen in de tijd. Aanvullend inzicht over de effecten van connectiviteit van brakke wateren op verschillende groepen organismen kan meer inzicht geven in de potenties en knelpunten voor binnendijks gelegen brakke wateren en handvatten geven voor (water-)beheer.

Referentiebeeld in Nederlandse context

Nederlandse brakke wateren zijn voor het overgrote deel te sterk verrijkt met nutriënten (stikstof en fosfor) en worden in meer of mindere mate door antropogene factoren beïnvloed. Op dit ogenblik ontbreekt een goed referentiebeeld voor verschillende typen binnendijkse brakke wateren in Nederland. Dit geldt voor de gehele levensgemeenschap in binnendijks gelegen brakke wateren, maar in iets mindere mate voor de vegetatie.

Hersteltijd

Over hersteltijd is nu zeer weinig bekend, dit geldt zowel voor de abiotische als de ecologische hersteltijd. Er is meer onderzoek nodig naar hoe de verschillende eigenschappen van een zoutpuls (of zoetpuls) het ecologisch functioneren beïnvloeden en wat de benodigde tijd is voor soorten en soortgemeenschappen om hiervan te herstellen. In het onderzoek is het van belang om de effecten van zout zuiver te scheiden van andere parameters die de hersteltijd kunnen beïnvloeden, waaronder sulfaat, ammonium en fosfor.

4.8 SAMENVATTING MET ZAKEN DIE RELEVANT ZIJN VOOR HET AFWEGINGSKADER

Op basis van het kennisoverzicht over de effecten van de zoet-zout dynamiek en de hersteltijd kan worden geconcludeerd dat er diverse kennishiaten zijn voor aquatische natuur. Door het complexe samenspel van (de eigenschappen van) een zoet- of zoutpuls met de biogeochemie (onder andere fosfor, sulfaat, ammonium), laat de zoet-zout dynamiek zich moeilijk uitdrukken in duidelijke grenswaarden voor soorten en soortgemeenschappen. Daarnaast is er zeer weinig bekend over de hersteltijd na een zoet- of zoutpuls anders dan dat bijvoorbeeld een hogere intensiteit, frequentie of duur van een zoet- of zoutpuls waarschijnlijk leidt tot

grotere nadelige effecten. Veldgegevens uit Nederland (bijlage I en bijlage II) laten zien dat soorten soms een breed bereik aan zoutgehaltes of ammoniakgehaltes aankunnen.

Echter kunnen sommige soorten die in Nederland als obligaat zoet worden gezien in het buitenland (onder meer constante omstandigheden qua zoutgehalte) bij hogere waardes voorkomen. We missen nu nog de kennis om te bepalen welke eigenschappen van een zoutpuls hiervoor (in kwantitatieve zin) bepalend voor zijn.

Om toch enige grip te krijgen op het in beeld brengen van effecten, zijn op basis van de thans beschikbare kennis en een deskundigenoordeel grenswaarden geformuleerd op het niveau van zogenoemde 'watertypen'. Hiermee wordt bedoeld op de combinatie van ontstaansgeschiedenis, bodemtype en huidige chloridegehalte zoals geformuleerd in tabel 4.2. De KRW-doeltypen en N2000 habitattypen zijn in deze 'watertypen' ondergebracht.

Hieronder is in tabellen (4.2 tot en met 4.6) een overzicht gegeven van de grenswaarden, waarbij we een onderscheid maken tussen drie perioden over het jaar die grofweg overeen komen met de groeistadia van ondergedoken waterplanten in Nederland, zijnde:






- voorjaar (april, mei, juni);
- zomer (juli, augustus, september);
- winterhalfjaar (oktober tot en met maart).

De kennis (en kennisleemten) in dit hoofdstuk toont aan dat er veel effecten kunnen optreden op de aquatische ecologie ten gevolge van een zout- of zoetpuls. Voor een systematische beoordeling is hier gekozen om deze effecten samen te vatten in vijf belangrijke factoren om risico's in te schatten (tabel 4.3):






- de kwetsbare levensfase: kiemende en jonge organismen zijn doorgaans gevoeliger voor veranderingen in het zoutgehalte;
- sterfte soorten: soorten kunnen ten gevolge van een zoutpuls sterven (of in geval van mobiele soorten weg migreren);
- oplading waterbodem: de waterbodem raakt opgeladen met zout, wat invloed heeft op de biogeochemie;
- afname waterplanten: de waterplantbedekking kan afnemen ten gevolge van veranderingen in zoutgehalte;
- Daphnia: Daphnia kan sterven bij een te hoog zoutgehalte, wat leidt tot een verandering in het voedselweb.

Deze vijf factoren zijn een vereenvoudiging van de complexe effecten die kunnen optreden. De huidige kennisleemten staan nu nog niet toe om het inschatten van risico's van effecten (op basis van een deskundigenoordeel van Van Geest Ecologie en B-WARE) met meer nuance en verdere specificering te doen.


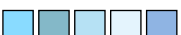




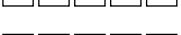


TABEL 4.3 SAMENVATTING VAN BELANGRIJKE FACTOREN OM EFFECTEN VAN EEN ZOUT- OF ZOETPULS OP DE AQUATISCHE ECOLOGIE TE BEPALEN

Kleur codering	Toelichting (berust op deskundigenoordeel van Van Geest Ecologie en B-WARE)
	kwetsbare levensfase: Er zijn mogelijk negatieve effecten te verwachten voor kiemend/jong leven door de zoutpuls
	sterfte soorten: Er zijn soorten die mogelijk sterven (of wegtrekken in het geval van mobiele soorten) door de zoutpuls
	oplading waterbodem: Er is mogelijk sprake van oplading van de waterbodem met zout
	afname waterplanten: Er is mogelijk sprake van een afname van waterplanten door de zoutpuls
	voedselweb/Daphnia: Er is mogelijk sprake van sterfte van Daphnia waardoor het voedselweb verandert

TABEL 4.4 RISICO INSCHATTING VAN HET WATERTYPE 'ZOET WATER (<300 MG CL/L)' VOOR VERSCHILLENDE MATE VAN VERZILTING OP VERSCHILLENDE MOMENTEN IN HET JAAR GERICHT OP WATERPLANTEN EN MACROFAUNA. EEN 'ZOUTPULS' DOELT OP EEN (TIJDELIJKE) VERHOGING VAN HET ZOUTGEHALTE BOVEN DE 300 MG CL/L. DE BETEKENIS VAN DE KLEURCODERING ONDER KOLOM 'TOELICHTING' IS TE LEZEN IN TABEL 4.3

Type water	Periode	Zoutpuls	Risico	Toelichting
zoet (<300 mg Cl/l)	voorjaar	>300 mg Cl/l	zeer sterk	
	zomer	300 - 3.000 mg Cl/l	sterk	
		>3.000 mg Cl/l	zeer sterk	
	winter	300 - 3.000 mg Cl/l	matig	
		>3.000 mg Cl/l	sterk	

TABEL 4.5 RISICO INSCHATTING VAN HET TYPE 'VERZOET (VOORHEEN BRAK, HUIDIG 300 - 1.000 MG CL/L), GEEN ZOUTPIEKEN >1.000 MG CL/L' VOOR VERSCHILLENDE MATE VAN VERZILTING OP VERSCHILLENDE MOMENTEN IN HET JAAR GERICHT OP WATERPLANTEN EN MACROFAUNA. DE BETEKENIS VAN DE KLEURCODERING ONDER KOLOM 'TOELICHTING' IS TE LEZEN IN TABEL 4.3

Type water	Periode	Zoutpuls	Risico	Toelichting
verzoet (was brak, nu 300 - 1.000 mg Cl/l), geen zoutpieken >1.000 mg Cl/l	voorjaar	<1.000 mg Cl/l	geen	
		1.000 - 10.000 mg Cl/l	sterk	
		>10.000 mg Cl/l	zeer sterk	
	zomer	300 - 1.000 mg Cl/l	geen	
		>1.000 mg Cl/l	sterk	
	winter	300 - 1.000 mg Cl/l	geen	
		1.000 - 3.000 mg Cl/l	klein	
		3.000 - 10.000 mg Cl/l	matig	
		>10.000 mg Cl/l	sterk	

TABEL 4.6 RISICO INSCHATTING VAN HET TYPE 'VERZOET (VOORHEEN BRAK, HUIDIG 300 - 1.000 MG CL/L), MET ZOUTPIEKEN > 1.000 MG CL/L' VOOR VERSCHILLENDE MATE VAN VERZILTING OP VERSCHILLENDE MOMENTEN IN HET JAAR GERICHT OP WATERPLANTEN EN MACROFAUNA. DE BETEKENIS VAN DE KLEURCODERING ONDER KOLOM 'TOELICHTING' IS TE LEZEN IN TABEL 4.3

Type water	Periode	Zoutpuls	Risico	Toelichting
verzoet (was brak, nu 300 - 1.000 mg Cl/l), mét zoutpieken >1.000 mg Cl/l	voorjaar	<1.000 mg Cl/l	geen	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		1.000 - 10.000 mg Cl/l	sterk	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>10.000 mg Cl/l	zeer sterk	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	zomer	300 - 3.000 mg Cl/l	matig	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		3.000 - 10.000 mg Cl/l	sterk	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>10.000 mg Cl/l	zeer sterk	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		300 - 1.000 mg Cl/l	klein	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	winter	1.000 - 3.000 mg Cl/l	geen	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		3.000 - 10.000 mg Cl/l	klein	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>10.000 mg Cl/l	sterk	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

TABEL 4.7 RISICO INSCHATTING VAN HET TYPE 'BRAK (1.000 - 3.000 MG CL/L)' VOOR VERSCHILLENDE MATE VAN VERZILTING OP VERSCHILLENDE MOMENTEN IN HET JAAR GERICHT OP WATERPLANTEN EN MACROFAUNA. DE BETEKENIS VAN DE KLEURCODERING ONDER KOLOM 'TOELICHTING' IS TE LEZEN IN TABEL 4.3

Type water	Periode	Zoutpuls	Risico	Toelichting
brak (1.000 - 3.000 mg Cl/l)	voorjaar	<3.000 mg Cl/l	n.v.t.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>3.000 mg Cl/l	sterk	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	zomer	<3.000 mg Cl/l	n.v.t.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>3.000 mg Cl/l	sterk	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	winter	300 - 3.000 mg Cl/l	n.v.t.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		3.000 - 10.000 mg Cl/l	klein	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>10.000 mg Cl/l	matig	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

TABEL 4.8 RISICO INSCHATTING VAN HET TYPE 'BRAK (3.000 - 10.000 MG CL/L)' VOOR VERSCHILLENDE MATE VAN VERZILTING OP VERSCHILLENDE MOMENTEN IN HET JAAR GERICHT OP WATERPLANTEN EN MACROFAUNA. DE BETEKENIS VAN DE KLEURCODERING ONDER KOLOM 'TOELICHTING' IS TE LEZEN IN TABEL 4.3

Type water	Periode	Zoutpuls	Risico	Toelichting
brak (3.000 - 10.000 mg Cl/l)	voorjaar	<10.000 mg Cl/l	n.v.t.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>10.000 mg Cl/l	klein	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	zomer	<10.000 mg Cl/l	n.v.t.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>10.000 mg Cl/l	klein	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	winter	<10.000 mg Cl/l	n.v.t.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
		>10.000 mg Cl/l	klein	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Voor het type 'brak (>10.000 mg Cl/l)' zijn geen risico's ingeschat voor verzilting omdat dit niet van toepassing is en ook buiten de scope van deze studie valt. Grenswaarden voor specifieke soorten of soortgemeenschappen zijn vooralsnog onbekend of onvoldoende onderzocht om alle onderliggende effecten van de zoutpuls en biogeochemisch andere belangrijke elementen (onder andere fosfor, sulfaat, ammonium) van elkaar te scheiden.

Voor verzoeting, alleen relevant bij brakke wateren, zijn de volgende grenswaarden van belang:

- echte brakwatersoorten zijn beperkt tot wateren met een chloridegehalte boven 1.000 mg Cl/l;
- langdurige blootstelling aan zoet vergroot de kans op de vestiging van zoetwatersoorten (en het verdwijnen van brakwatersoorten);
- langdurige blootstelling van zwak brakke wateren (300 – 1.000 mg Cl/l) aan zoet water (<300 mg Cl/l) heeft nauwelijks of geen negatieve effecten. In theorie kan er dan zelfs een kwaliteitsverbetering optreden (bij permanent lagere zoutgehaltes);
- blootstelling aan zoet(er) water tijdens het winterhalfjaar heeft op de vegetatie niet of nauwelijks effect, maar mogelijk wel op macrofauna en vis.

Ten aanzien van de biogeochemie zijn risico's bepaald op basis van een deskundigenbeoordeling om te duiden hoe de ontstaansgeschiedenis van een gebied en het bodemtype kunnen leiden tot nadelige effecten qua interne eutrofiëring, sulfidotoxiciteit en ammoniumtoxiciteit. Met name wateren die onder zoete condities zijn ontstaan en thans nog steeds zoet oppervlaktewater hebben, en die een veenbodem of organische sliblaag hebben, zijn het meest gevoelig.

TABEL 4.9 RISICOBEPALING VAN HET EFFECT VAN VERZILTING OP ABIOTISCHE PROCESSEN DIE KUNNEN LEIDEN TOT NADELIGE EFFECTEN TER ATTENTIE VAN INTERNE EUTROFIËRING, SULFIDETOXICITEIT EN/OF AMMONIUMTOXICITEIT

Ontstaans- geschiedenis	Bodemtype	Risicobepaling		
		Interne eutrofiëring	Sulfidotoxiciteit	Ammoniumtoxiciteit (en evtueel ammoniaktoxiciteit)
zoet - zoet	veen (of als een organische sliblaag)	hoog	hoog	hoog
	klei	midden	laag	laag
	zand	laag	laag	laag
brak - zoet*	veen (of als een organische sliblaag)	midden	midden	midden
	klei	laag	laag	laag
	zand	laag	laag	laag
brak - brak	veen (of als een organische sliblaag)	laag	laag	laag
	klei	laag	laag	laag
	zand	laag	laag	laag

* N.B. aangaande 'verzoete wateren (Brak-Zoet)': de periode dat een water reeds verzoet is, werkt door op de abiotische effecten: hoe langer een systeem verzoet is, hoe meer dit zich als een zoet systeem gaat gedragen. Uiteraard is dit ook weer afhankelijk van de oorspronkelijke zoutconcentratie en het hydrologisch functioneren van het systeem (verblijftijd, wel/niet gevoed door kwel gevoed etc.). In de regel kan wel gesteld worden dat het jaren tot decennia kan duren voordat een voormalig brakke waterbodem zich als een zoete waterbodem gaat gedragen.

5

TERRESTRISCHE NATUUR

5.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de kennis over de effecten van zout op terrestrische ecosystemen. De vragen die centraal staan in dit hoofdstuk zijn:

- wat zijn de effecten van zoet-zout dynamiek en bijbehorende neveneffecten op de terrestrische ecologie?
- wat is de hersteltijd?

Hierbij bespreken we eerst de effecten van zout op de soortenrijkdom, soortensamenstelling en het ecologisch functioneren van terrestrische natuur (paragraaf 5.2). Vervolgens gaan we nader in wat dit betekent voor de hersteltijd (paragraaf 5.3). Paragraaf 5.4 beschrijft de kennishiaten en het onderzoek dat benodigd is om deze kennishiaten te adresseren. Het hoofdstuk sluit af met een samenvatting met de zaken die relevant zijn voor het afwegingskader (paragraaf 5.4).

5.2 EFFECTEN ZOET / ZOUT DYNAMIEK

5.2.1 SOORTENRIJKDOM

Om welke terrestrische natuurdoelen gaat het? In hoofdstuk 2 is al melding gemaakt van habitattypen waarbij zout een rol speelt (Dobben *et al.*, 2008). Het gaat overwegend om zilte habitattypen die zout goed kunnen verdragen. Er zijn ook veel zoete habitattypen, waarvoor algemeen geldt dat deze gevoelig zijn voor zout (tabel 5.1). Voor het NNN is specifiek melding gemaakt van zilt- en overstromingsgrasland (tabel 5.2). Het betreft vaak buitendijks gebied, maar ook binnendijks komen zilt- en overstromingsgraslanden voor, met name in Zeeland. Daarnaast zijn er tal van zoete beheertypen die in Laag-Nederland in meer of mindere mate te maken hebben met verzilting (afbeelding 5.1 & tabel 5.2). Voor de vegetatie wordt ook nog een fijnere indeling onderscheiden, te weten associaties ofwel plantengemeenschappen.

Er zijn verschillende applicaties beschikbaar waarmee de milieुरandvoorwaarden van terrestrische vegetatie (inclusief zout) **kunnen** worden opgezocht. Binnen de applicatie Waternood⁷ kan dit voor habitattypen, beheertypen en plantengemeenschappen (Runhaar *et al.*, 2014). Binnen de applicatie Symbiosis⁸ kan dit voor habitattypen, beheertypen, SBB typen, plantengemeenschappen en soorten. Binnen het CML ecotopensysteem wordt onderscheid gemaakt in zoete, brakke en zoute ecotopen (Runhaar *et al.*, 2004). Men moet zich wel realiseren dat het om correlaties gaat die niet altijd hoeven te kloppen, bijvoorbeeld omdat bepaalde milieus ondervertegenwoordigd zijn in de beperkte dataset. Daarnaast is het zo dat het milieu-indicatieve vermogen van een groep planten vaak groter is dan van een individuele soort. In bijlage IV is een niet uitputtende soortenlijst opgenomen van zouttolerante planten, indifferente planten en zoutintolerante planten.

⁷ <https://www.synbiosys.alterra.nl/waternood/>.

⁸ <https://www.synbiosys.alterra.nl/synbiosysnl/>.

AFBEELDING 5.1 DE VERSPREIDING VAN NNN BEHEERTYPEN (IN LICHT GROEN) EN N2000 HABITATTYPEN (IN DONKERGROEN) IN HET DEEL VAN NEDERLAND DAT RISICO'S TEN GEVOLGE VAN VERZILTING (EN VERZOETING) KAN ERVAREN (IN GRIJS). DE GRIJZE ZONE IS BEPAALD MIDDELS DE KLIMAATEFFECTATLAS⁹. DROGE EN BUITENDIJKSE TYPEN ZIJN HIER NIET IN MEEGENOMEN (BUITEN DE SCOPE) EN AQUATISCHE TYPEN WORDEN BEHANDELD IN HOOFDSTUK 4



TABEL 5.1 HABITATTYPEN IN LAAG-NEDERLAND WAAR VERZILTING MOGELIJK IS. DE ZOUTTOLERANTIE IS INDICATIEF AANGEGEVEN MET DE AANNAME DAT ZEER VOEDSELRIJKE TYPEN MEER TOLERANT ZIJN VOOR VERZILTING DAN MATIG VOEDSELRIJKE OF VOEDSELARME TYPEN

Habitattypen	Zouttolerantie
H1320, H1330_B, H6430_B, H6510_B	tolerant
H2140_A, H2180_B, H2180_C, H2190_D, H6430_A, H6510_A, H91E0_A, H91E0_B, H91E0_C	matig tolerant
H2190_B, H2190_C, H4010_B, H6120, H6230, H6410, H7140_A, H7140_B, H7150, H7210, H7230, H91D0	gevoelig

TABEL 5.2 BEHEERTYPEN IN LAAG-NEDERLAND WAAR VERZILTING MOGELIJK IS. DE ZOUTTOLERANTIE IS INDICATIEF AANGEGEVEN MET DE AANNAME DAT ZEER VOEDSELRIJKE TYPEN MEER TOLERANT ZIJN VOOR VERZILTING DAN MATIG VOEDSELRIJKE OF VOEDSELARME TYPEN

Beheertypen	Zouttolerantie
N01.03, N05.02, N05.03, N05.04, N12.02, N12.04, N12.06, N13.01, N13.02, N14.01, N17.04, N17.05, N17.06	tolerant
N10.02, N12.01, N12.03, N12.05, N14.02, N14.03, N15.01, N15.02, N16.04, N17.03	matig tolerant
N06.01, N06.02, N06.04, N10.01	gevoelig

9 <https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/>: kaart met zoutvrucht in huidige situatie en kaarten die zoutindringing in oppervlaktewater laten zien.

Het is belangrijk te beseffen dat de indeling van beheer- en habitattypen vooral gebaseerd is op de ruimtelijke verspreiding (het wel/niet voorkomen in kuststrook en in brakwatergebieden) van deze typen. Dit hoeft echter niet te betekenen dat het uitblijven van typen in de kuststrook automatisch betekent dat een type zoutgevoelig is. Veel vegetatietypen ontbreken in de kuststrook omdat de standplaatsen om andere redenen voor hen ongeschikt zijn, bijvoorbeeld omdat ze te voedselrijk of te basisch zijn.

Voor diverse soorten die als obligaat zoet zijn geïdentificeerd, is bekend via waarnemingen in het buitenland dat ze ook in licht brak tot brak water kunnen voorkomen. Dit geldt vooral voor soorten gekoppeld aan helder voedselarm water. Doordat dergelijke milieutypen ondervertegenwoordigd zijn in de waarnemingen, worden er verkeerde correlaties gelegd.

Binnen de onderscheiden habitattypen en beheertypen komen ook verschillende type bossen voor. Door Wageningen Research is in samenwerking met andere partijen een website gepubliceerd (bomentabel.nl) met daarin een lijst boomsoorten (inheems en cultivars) en hoe gevoelig de boomsoorten zijn voor omgevingsfactoren. Volgens deze bomentabel zijn de volgende soorten matig tolerant voor (strooi)zout: Spaanse aak (*Acer campestre*), Zwarte els (*Alnus glutinosa*), Ruwe berk (*Betula pendula*), Es (*Fraxinus excelsior*), Witte abeel (*Populus alba*), Zwarte populier (*Populus nigra*), Ratelpopulier (*Populus tremula*), Wintereik (*Quercus petraea*), Zomer eik (*Quercus robur*) en Robinia (*Robinia pseudoacaci*). In de periode 1979-1983 zijn potproeven uitgevoerd om de zouttolerantie van populieren en wilgen te testen tegen brak en zout grondwater. Wilgen zijn over het algemeen zoutgevoeliger dan populieren. Wel bleken sommige Katwilg (*Salix viminalis*) individuen zeer zouttolerant te zijn (Van de Burg, 1984).

5.2.2 VERSCHILLEN IN ECOLOGISCH FUNCTIONEREN VAN VERSCHILLENDE SITUATIES

Voor de terrestrische natuur wordt onderscheid gemaakt tussen drie situaties die relevant zijn om te bepalen hoe de zoet-zout dynamiek doorwerkt op de natuur (zie ook: paragraaf 2.3.5):

- permanent brakke gebieden; Wel/geen inlaat van zoet water;
- voorheen brak, nu verzoet; eventueel nog met een onderscheid tussen bodemtypen;
- in zoet ontstaan, nu blootgesteld aan zout(puls); Effect van bodemtypen.

Hieronder wordt per situatie toegelicht hoe de zoet-zout dynamiek, zoals beschreven in hoofdstuk 3, doorwerkt op de terrestrische natuur.

PERMANENT BRAKKE GEBIEDEN; WEL/GEEN INLAAT VAN ZOET WATER

Inundaties met brak water

Voorheen kwamen er rondom de Zuiderzee veel brakke tot zilte vegetaties voor. In de Zuiderzee was een gradiënt aanwezig in zoutgehaltenes waarbij in het zuiden het water zoeter was (in de orde van 3.000 tot 6.000 mg Cl/l) dan in het noorden (meer richting de 19.000 mg Cl/l). Tijdens stormen konden grote delen rondom de Zuiderzee overstromen met dit brakke water. Door de afsluiting van de Zuiderzee raakte het IJsselmeergebied snel zoet. Door de aanleg van de Rijkspolders verdween ook de sterke dynamiek in waterpeilen. Overstromingen kwamen niet meer voor. Hierdoor zijn graslanden rondom het IJsselmeergebied verzoet en deels ook verzuurd. Iets vergelijkbaars is opgetreden in de kustzone van Friesland nadat de Middellzee werd afgesloten en men van terpen overging naar een algehele afsluiting van de kustzone via zeedijken.

Via waterbeheer kan men actief sturen op inundaties met brak water wanneer ook brak of zout water voorhanden is. Een voorbeeld is het ‘plan Tureluur’ in Zeeland uit begin jaren 90. Hierbij is een voormalig landbouwgebied ingericht ten behoeve van brakke en zoute natuur (Beijersbergen & van der Reest, 2004). Verder speelt verbrakking in polder West Zaan waarbij plannen worden gemaakt om deze voormalige brakke polder die sterk verzoet is weer zilt te maken en er zijn gebieden langs het Noordzeekanaal (onder andere de Westhoffplas in de Houtrakpolder, de Houtrakkerbeemden) die men opnieuw verbrakt waardoor kenmerkende zilte soorten weer kunnen voorkomen.

Uitspoeling

Gebieden die lange tijd onder invloed van zout water hebben gestaan kunnen in snel tempo verzoeten. Door regenwater kan het zout snel uit de grond wegspoelen, vooral op plekken waar zoet regenwater gemakkelijk kan uitspoelen zoals zandgronden met een diepere grondwater. Zo is van Het Markiezaat bekend dat na afsluiting in 1983 van de Oosterschelde een snelle verzoeting (circa 4 jaar) van percelen is opgetreden (Cusell *et al.*, 2018; Röling, 1994). Op plekken waar uitspoeling van zout water niet goed mogelijk is, blijft zilt water lang op zijn plek.

Seaspray

Seaspray of zoutspray is een proces waarbij langs de kust als gevolg van het breken van de golven door de wind kleine waterdruppeltjes door de wind worden opgepakt die verder landinwaarts kunnen neerslaan. Dit is een extra bron van zout in een smalle zone langs de kust (Jansen, 1998). In de duinen reikt de invloed van zoutspray doorgaans niet verder dan de buiten- en middenduinen (Stofberg, 2017). Het ecologisch effect in terrestrische systemen is beperkt, doordat het zout gemakkelijk uitspoelt. Wel is er een punt van zorg dat er sprake is van een verhoogde mate van PFAS aanvoer via zoutspray.

VOORHEEN BRAK, NU VERZOET

Het voorkomen van brakke kwel

Brakke kwel vinden we met name in grote delen van de provincie Zeeland, als ook in droogmakerijen en diverse andere laaggelegen gebieden in de kustprovincies Zuid-Holland, Noord-Holland, Friesland en Groningen. Voorbeelden van gebieden (buiten provincie Zeeland) met invloed van brakke kwel zijn de polder Callantsoog (Ten Haaf en Pauw, 2021) en het Natura 2000 gebied Abtskolk & De Putten. De Harger en Pettemerpolder is een inlaag¹⁰ met brakke kwel waar veel vogels foerageren en broeden. Er waren zorgen om verzoeting en daarmee gepaard gaande eutrofiering, vanwege de verbreding van de zeewering met een kunstmatig strand. In de praktijk blijkt dat mee te vallen. Het oppervlaktewatersysteem in Waterland is sterk verzoet, maar er komen ook hier nog plekken voor met brakke kwel (langs de voormalige Zuiderzee) en de boezem heeft verhoogde chloridegehalten doordat water uit de droogmakerijen op de boezem wordt uitgemalen. Het Natura 2000-gebied Botshol staat onder invloed van brak grondwater afkomstig uit polder Groot-Mijdrecht.

Binnen gebieden met brakke kwel kan water met een verhoogd zoutgehalte de wortelzone bereiken. Het voorkomen van brakke kwel is te beïnvloeden met waterbeheer. Zo daalde het chloridegehalte in de Koopmanspolder na peilopzet, terwijl peilverlaging tot een verhoging in chlorideconcentraties leidde in het oppervlaktewater. Met peilverhoging wordt (brakke) kwel onderdrukt (Van Ek, 2016; Van Ek *et al.*, 2017). Verder kan het zoutgehalte worden verlaagd via doorspoeling met zoetwater. Deze (in stand gehouden) verzoeting komt ten

¹⁰ Gebied tussen een door dijkval bedreigde dijk en een inlaagdijk.

gunste van de zoete terrestrische natuur die thans op veel van deze voorheen brakke, maar nu zoete gebieden in Laag-Nederland voorkomt.

Effect van zout water op veenafbraak

In Noord-Holland waren veel veengebieden in het verleden in/onder brak water komen te staan. Tegenwoordig is dit gebied sterk verzoet, is de vegetatiesuccessie op veel plekken tot stilstand gekomen en overheerst veenafbraak. De kwaliteit van die veengebieden is achteruitgegaan. De suggestie is gedaan dat water met een hoog zoutgehalte mogelijk een conserverend effect heeft waardoor veenafbraak wordt geremd (Van Dijk *et al.*, 2013a; 2013b). De effecten van zout op de veenafbraak zijn echter zeer complex en betreffen nog deels een kennis lacune. Zout zelf lijkt de veenafbraak te kunnen afremmen, maar het sulfaat wat met het zout meekomt kan de anaerobe afbraak juist weer stimuleren (Herbert *et al.* 2015). Volgens een literatuurstudie van het Louis Bolk Instituut (Pijlman *et al.*, 2021) zijn de belangrijkste effecten van verzilting in veengrond vastgesteld op de aerobe laag. Zij melden dat de aerobe veenafbraak kon halveren bij 4 g Cl/l zout in poriewater (Brouns *et al.*, 2014) en dat een afname van 47-55 % in bodemrespiratie mogelijk is bij verzilting van 5-10 g Cl/l (Yang *et al.*, 2018). In niet alle studies is echter sulfaat meegenomen waardoor het moeilijk is de resultaten te extrapoleren naar de praktijk. Het netto effecten van verzilting op veenafbraak is nog een kennislacune, verzilting heeft verschillende effecten op diverse afbraak- en redox-processen. Over het algemeen lijkt de afbraak van organisch materiaal in voormalig brakke waterbodems afgeremd worden door verzilting, maar zou de afbraak in zoete systemen wel eens gestimuleerd kunnen worden als gevolg van verzilting.

Er komt steeds meer consensus over dat verzilting de methanogenese (en methaanemissies) vanuit waterbodems afremt (onder andere Soued *et al.* 2024, Van Dijk *et al.* 2024). De effecten van verzilting op oevers en terrestrische bodems met wisselende grondwaterstanden is nog een kennislacune.

Effect van zout op kleibodems

Verzilting van kleigrond kan leiden tot slempvorming en de poriënstructuur verslechteren, wat nadelige gevolgen heeft voor terrestrische vegetatie. Planten die zijn aangepast aan dergelijke omstandigheden, bijvoorbeeld door de aanleg van luchtweefsel (aerenchym ofwel parenchym met grote intercellulaire luchtholten), hebben dan een concurrentievoordeel ten opzichte van planten die niet zijn aangepast aan dergelijke omstandigheden.

Het indampen van zoetwaterlenzen in gebieden met brakke kwel

Gebieden die gekenmerkt worden door regenwaterlenzen bovenop brak grondwater kunnen in de warme zomer indampen. Hierdoor kan brak grondwater alsnog de wortelzone bereiken en de doorgaans zoete terrestrische natuur nadelig beïnvloeden. Met name de lager gelegen gebieden kunnen daardoor onder invloed komen te staan van (brakke) kwel. De verwachting is dat dit in de toekomst meer gaat optreden.

Infiltratie van de oeverzone

Wanneer brak water alleen in het oppervlaktewater voorkomt (bijvoorbeeld door inlaat), kan dit van invloed zijn op de oeverzone. Uit onderzoek in het brakke IJperveld blijkt dat het zout maar in geringe mate (tot op ca 1 à 2 m vanaf de oeverlijn) doordringt tot in veenmosrietland (Bootsma *et al.*, 2002). Dit effect is dus beperkt maar wordt relatief groot als een gebied sterk doorsneden is met veel watergangen en wat contact tussen water en land groot is. Overigens bestaat er een bijzondere vorm van veenmosrietland, het veenmosbiezenland: Pallavicinio-

Sphagnetum typicum, dat juist last heeft van verzoeting. Dit type komt nog op een beperkt aantal locaties goed ontwikkeld voor in Noord-Holland (Van 't Veer et al. 2009, Van Dijk et al. 2014). De meeste van deze locaties betreffen relictvegetaties, afkomstig van jonge verlandingen die zich hebben ontwikkeld toen het chloridegehalte van het oppervlaktewater nog 1.000 mg Cl/l of hoger was (Reigersman 1946; De Vries & Vrijhof, 1958).

IN ZOET ONTSTAAN, NU BLOOTGESTELD AAN ZOUT(PULS); EFFECT VAN BODEMTYPEN

Externe verzilting

In de jaren 70 zorgde grootschalige zoutlozingen in de Rijn voor een verhoogd chloridegehalte in het Rijnwater. Via inlaat kwam dit water terecht in diverse polders in Laag-Nederland. Voor mesotrofe verlandingsvegetaties met obligaat zoete soorten werd dit als een grote bedreiging gezien (Barendregt *et al.*, 1986; Barendregt en van Leerdam, 1990). Inmiddels, sinds het arrest van 1988 van Stichting Reinwater, is deze vorm van vervuiling gestopt. Tegenwoordig is vooral droogte en externe verzilting een risico.

In droge tijden kan het zoutgehalte in boezemsystemen oplopen doordat de waterkwaliteit steeds meer wordt gedomineerd door brak water afkomstig uit droogmakerijen (interne verzilting).

Doorspoeling met zoet rivierwater wordt gebruikt om het zoutgehalte te verminderen, maar tijdens droogte kan het aanbod aan zoet rivierwater te gering zijn. Verder kan in perioden met geringe afvoer van zoet rivierwater de zouttong ver landinwaarts komen. Tijdens droogte dalen waterpeilen en neemt vanuit het achterland de behoefte aan inlaat toe om polders op peil te houden. Dit speelt onder andere langs de Hollandse IJssel, de Lek en langs het Noordzeekanaal. Voor sloten met obligaat zoete soorten en aanpalende oevers is dit een bedreiging met mogelijk onomkeerbare schade (Runhaar, 2006). Of dit brakke en zoute water een probleem is voor terrestrische systemen hangt af van de mate waarin het oppervlaktewater de bodem kan binnendringen en de wortelzone kan beïnvloeden. In Laag Nederland hebben we vaak te maken met veen en kleibodems waarbij de intreeweerstand laag is. Hierdoor is het effect van oppervlaktewater met ongunstige kwaliteit op terrestrische systemen beperkt. Voor aquatische gemeenschappen (inclusief oevervegetaties) is dat een heel ander verhaal en zijn er grote effecten te verwachten.

5.2.3 GRENSWAARDEN VOOR VERZILTING EN VERZOETING

Voor het bepalen van kritische grenswaarden is voor habitattypen gebruik gemaakt van de database ecologische randvoorwaarden habitattypen. De grenswaarden staan vermeld in tabel 5.3. Doordat habitattypen vegetatiekundig kunnen verschillen (en daarmee hun gevoeligheid voor zout of zoet water), zijn voor een aantal habitattypen meerdere kritische grenzen opgenomen. Als de samenstelling van de plantengemeenschap onbekend is, dan is het advies gebruik te maken van de laagste kritische grens (in geval van verzilting) of hoogste kritische grens (in geval van verzoeting).

TABEL 5.3 GRENSWAARDEN VOOR CHLORIDE IN MG CL/L BIJ VERZOETING EN VERZILTING VAN HABITATTYPE OP BASIS VAN EEN DESKUNDIGEN OORDEEL. MINDER KRITISCHE GRENSWAARDEN (AFHANKELIJK VAN DE SAMENSTELLING VAN DE PLANTENGEMEENSCHAP) ZIJN AANGEGEVEN TUSSEN HAAKJES. DE BETREFFENDE PLANTENGEMEENSCHAPPEN WAARVOOR DEZE GRENSWAARDEN VAN TOEPASSING ZIJN STAAN VERMELD IN DE KOLOM 'TOELICHTING'. DE GRENSWAARDEN ZIJN INDICATIEF EN VEREISEN IN VEEL GEVALLEN NOG VERIFICATIE DOOR ONDERZOEK

Natuurdoel (Natura 2000 habitattypen)	Kritische grens verzoeting (mg Cl/l)	Kritische grens verziltting (mg Cl/l)	Toelichting
H1320 - slijkgrasvelden	3.000	n.v.t.	
H1330_B - schorren en zilte graslanden (binnendijks)	1.000	n.v.t.	
H6430_B - ruigten en zomen (harig wilgenroosje)	n.v.t.	10.000	
H6510_B - glanshaver- en vossenstaarthooilanden (grote vossenstaart)	n.v.t.	300	
H2140_A - duinheiden met kraaihei (vochtig)	n.v.t.	150 (300)	grens 300: 20AB04
H2180_B - duinbossen (vochtig)	n.v.t.	150	
H2180_C - duinbossen (binnenduintrand)	n.v.t.	150	
H2190_D - vochtige duinvalleien (hoge moerasplanten)	n.v.t.	3.000	
H6430_A - ruigten en zomen (moerasspirea)	n.v.t.	150	
H6510_A - glanshaver- en vossenstaarthooilanden (glanshaver)	n.v.t.	150	
H91E0_A - vochtige alluviale bossen (zachthoutoobossen)	n.v.t.	300	
H91E0_B - vochtige alluviale bossen (essen-iepenbossen)	n.v.t.	150	
H91E0_C - vochtige alluviale bossen (beekbegeleidende bossen)	n.v.t.	150	
H2190_B - vochtige duinvalleien (kalkrijk)	n.v.t.	3.000	
H2190_C - vochtige duinvalleien (ontkalkt)	n.v.t.	300	
H4010_B - vochtige heiden (laagveengebied)	n.v.t.	150 (3.000?)	grens 3000: 11BA02B
H6120 - stroomdalgraslanden	n.v.t.	150	
H6230 - heischrale graslanden	n.v.t.	150	
H6410 - blauwgraslanden	n.v.t.	150	
H7140_A - overgangs- en trilvenen (trilvenen)	n.v.t.	150	
H7140_B - overgangs- en trilvenen (veenmosrietlanden)	n.v.t.	150 (1.000)	grens 1000: 09AA02B
H7150 - pioniervegetaties met snavelbiezen	n.v.t.	150	
H7210 - galigaanmoerassen	n.v.t.	300	
H7230 - kalkmoerassen	n.v.t.	150 (300)	grens 300: 09BA05, SBB-09C2
H91D0 - hoogveenbossen	n.v.t.	150	
hatitatrictlijnsoort kruipend moerasscherm	n.v.t.	3.000	

Op een vergelijkbare manier zijn ook grenswaarden bepaald voor de beheertypen (tabel 5.4). Hierbij is gebruik gemaakt van Waternood, versie 3.0. Beheertypen waarvoor grenswaarden bekend zijn, zijn aangegeven in blauw; beheertypen waarvoor geen grenswaarden bekend zijn, zijn aangegeven in grijs.

Deze grenswaarden kunnen wel worden achterhaald via Waternood¹¹ en/of Synbiosis¹², mits de vegetatiekundige samenstelling bekend is. Doordat beheertypen vegetatiekundig kunnen verschillen (en daarmee hun gevoeligheid voor zout of zoet water), zijn voor een aantal beheertypen meerdere kritische grenzen opgenomen. Als de samenstelling van de plantengemeenschap onbekend is, dan is het advies gebruik te maken van de laagste kritische grens (in geval van verziltting) of hoogste kritische grens (in geval van verzoeting).

11 Zie <https://www.synbiosys.alterra.nl/waternood/> Dit is een systeem waarmee men de haalbaarheid van natuurdoelen kan toetsen aan de hydrologische randvoorwaarden.

12 Zie <https://www.synbiosys.alterra.nl/synbiosysnl/> Dit is een systeem waarin informatie kan worden opgezocht over Nederlandse plantengemeenschappen, waaronder de abiotische randvoorwaarden.

TABEL 5.4 GRENSSWAARDEN VOOR CHLORIDE IN MG CL/L BIJ VERZOETING EN VERZILTING VAN BEHEERTYPEN. NIET VOOR ALLE NATUURBEHEERTYPEN ZIJN GRENSSWAARDEN BEKEND (DEZE ZIJN MIDDELS EEN DESKUNDIGENOOORDEEL BEPAALD EN AANGEGEVEN IN GRIJS). MINDER KRITISCHE GRENSSWAARDEN ZIJN AANGEGEVEN TUSSEN HAAKJES (AFHANKELIJK VAN DE SAMENSTELLING VAN DE PLANTENGEMEENSCHAP). DE BETREFFENDE PLANTENGEMEENSCHAPPEN WAARVOOR DEZE GRENSSWAARDEN VAN TOEPASSING ZIJN STAAN VERMELD IN DE KOLOM 'TOELICHTING'. DE GRENSSWAARDEN ZIJN INDICATIEF EN VEREISEN IN VEEL GEVALLEN NOG VERIFICATIE DOOR ONDERZOEK

Natuurdoel (NNN beheertypen)	Kritische grens verzoeting (mg Cl/l)	Kritische grens verziltting (mg Cl/l)	Toelichting
N01.03-rivier- en moeraslandschap	n.v.t.	300	brede standplaats
N05.02-gemaaid rietland	n.v.t.	300	
N05.03-veenmoeras	n.v.t.	300	
N05.04-dynamisch Moeras	n.v.t.	300	
N12.02-kruiden- en faunarijk grasland	n.v.t.	300	
N12.04-zilt- en overstromingsgrasland	n.v.t. (1.000/3.000)	n.v.t.	grens 1000: 26AB02, 26AB04, 26AC01B, 26RG04 grens 3000: 25AA02, 26AA01B, 26AA01, 26AB01B, 26AB03, 26AC02, 26RG02, 26RG03
N12.06-ruigteveld	n.v.t.	300	
N13.01-vochtig weidevogelgrasland	n.v.t.	300 (3.000)	grens 3000: 12BA02
N13.02-wintergasteweide	n.v.t.	300 (3.000)	grens 3000: 12BA02
N14.01-rivier- en beekbegeleidend bos	n.v.t.	300	
N17.04-eendenkooi	n.v.t.	300	
N17.05-wilgengriend	n.v.t.	300	
N17.06-vochtig en hellinghakhout	n.v.t.	300	
N10.02-vochtig hooiland	n.v.t.	300 (1.000/3.000)	grens 1000: 08BC01, 08RG07 grens 3000: 12BA03A, 12BA03B
N12.01-bloemdijk	n.v.t.	150 (300)	grens 300: 16BC01A, 17AA01B
N12.03-glanshaverhooiland	n.v.t.	150 (300)	grens 300: 16BA02
N12.05-kruiden- en faunarijke akker	n.v.t.	300	
N14.02-hoog- en laagveenbos	n.v.t.	150	
N14.03-haagbeuken- en essenbos	n.v.t.	150	
N15.01-duinbos	n.v.t.	150 (300)	grens 300: 37AC01, 37AC02B
N15.02-dennen-, eiken-, en beukenbos	n.v.t.	150	
N16.04-vochtig bos met productie	n.v.t.	300	
N17.03-park- en stinzenbos	n.v.t.	300	
N06.01-veenmosrietland en moerasheide	n.v.t.	150 (1.000)	grens 1000: 09AA02, 09AA02B, 11BA02B
N06.02-trilveen	n.v.t.	150	
N06.04-vochtige heide	n.v.t.	150	
N10.01-nat schraalland	n.v.t.	150 (300/1.000)	grens 300: 07AA03, 08C02A, 08C03, 08RG07, 09BA05, 16AB04, 28AA01 grens 1000: 06AC04, 08AA04

5.3 HERSTELTIJD

In een overzicht van de zouttolerantie van natuurdoeltypen (Paulissen *et al.*, 2007) wordt ingegaan op hersteltijd. Tegenwoordig wordt geen gebruik meer gemaakt van de indeling in natuurdoeltypen. Wel is via een vertaaltabel een vertaling mogelijk naar beheertypen. Zo vallen de natuurdoeltypen 3.41 binnendijks zilt grasland, 3.32a zilverschoon grasland en 3.32c nat, matig voedselrijk grasland onder N12.04 zilt- en overstromingsgrasland.

Als startpunt voor herstel wordt het moment beschouwd waarop de chlorideconcentratie in een systeem, na het ontstaan van significante schade, weer tot de norm gedaald is. In feite wordt hier bedoeld op de biotische hersteltijd. De hersteltijd is aangegeven als een bereik met een minimum- en een maximumwaarde (in jaren). De waarde 99999 is als maximumwaarde toegekend in gevallen waarin de hersteltijd was omschreven als, bijvoorbeeld, '>25 jaar'. Natuurdoeltypen met een onbekende hersteltijd hebben de score- 999 gekregen. De resultaten staan vermeld in de tabel in bijlage V. Er zijn twee bronnen gebruikt voor het opstellen van het overzicht met hersteltijden (Runhaar *et al.*, 2004; Broekmeyer *et al.*, 2006). Desondanks ligt er vrij weinig onderzoek, waardoor de hersteltijd vooral als een kennishiaat moet worden gezien.

Ook hier is het aannemelijk dat soortenrijke zoete voedselarme tot matig voedselrijke systemen veel kwetsbaarder zijn voor verzilting dan voedselrijke, brakke tot licht brakke systemen voor verzoeting (zie ook samenvatting zouttolerantie in tabel 5.1 & tabel 5.2).

Het is moeilijk om algemene uitspraken te doen over de gevoeligheid van terrestrische systemen voor verzilting of verzoeting. Het effect hangt namelijk erg af van de aard van de puls en de mate van verzilting of verzoeting. Zo is het voor het bepalen van het effect relevant welke route het inlaatwater aflegt binnen een watersysteem in combinatie met de ligging van de meest gevoelige ecosysteemttypen. Die meest gevoelige ecosysteemttypen zijn vaak nog aanwezig juist omdat deze relatief geïsoleerd zijn van gebiedsvreemd water.

Verder is de vraag in welke mate ingelaten water met een afwijkende kwaliteit de wortelzone van kwetsbare ecosysteemttypen kan bereiken. Peilopzet in de watergangen met water van ongunstige kwaliteit hoeft niet direct de terrestrische ecosystemen te schaden. Het kan zelfs gunstig zijn in tijden van droogte (beperking drainage, rem op verdere grondwaterstandsdalingen) mits het water niet sterk infiltreert in de percelen. De invloed van inlaat zal dus per geval beoordeeld moeten worden. Doordat er zo weinig bekend is over hersteltijden, is het verstandig om terughoudend te zijn bij het inlaten van water met een verhoogd zoutgehalte, zeker wanneer er zeldzame zoete voedselarme tot matig voedselrijke systemen aanwezig zijn.

5.4 KENNISHIATEN EN BENODIGD ONDERZOEK

In een rapport uit 2007 (Paulissen *et al.*, 2007) worden een aantal kennishiaten genoemd ten aanzien van het zoutgehalte en natuur(doel)typen. Deze worden hieronder toegelicht.

Systematische meetgegevens over milieuranges van soorten

Er is behoefte aan systematische meetgegevens ter onderbouwing van de milieuranges van plantensoorten dan wel -gemeenschappen. Ertsen *et al.* (1998) hebben voor Noord-Holland en Utrecht gemeten aan chloride in ondiep grondwater en de waarden (mg Cl/l) gecorreleerd

aan Ellenbergwaarden¹³ voor saliniteit. Wamelink & Runhaar hebben de dataset aangevuld en een correlatie uitgevoerd voor het volledige bereik aan Ellenbergwaarde. Er is geen goede dataset die het chloridegehalte in de wortelzone relateert aan Ellenbergwaarden of een andere vorm van indicatiewaarden. Specifiek voor houtige soorten is er relatief weinig bekend. De dataset die er is, bevat wel het voorkomen van plantensoorten en chloridegehalten, maar omdat de locaties waar de concentraties zijn gemeten, sterk wisselen, is er geen zuivere interpretatie mogelijk. De gevoeligheid voor verzilting kan niet worden onderbouwd met deze meetgegevens. Deze kennislacune kan worden aangevuld door experimenteel werk.

Standaard normering voor chloride op basis van soorten en soortgemeenschappen

Een beter onderbouwde normering voor chloride is gewenst. Verzilting zal in toenemende mate leiden tot kansen én bedreigingen voor habitattypen, beheertypen dan wel plantengemeenschappen en doelsoorten in Laag-Nederland. Er is dringend behoefte aan chloridenormen gebaseerd op de tolerantie van individuele plantengemeenschappen, doeltypen en doel- en habitatrichtlijnsoorten. De methode om via Ellenberggetallen daartoe te komen, biedt hiervoor een basis maar uiteindelijk moet een koppeling worden gelegd met direct in het veld meetbare grootheden. In de toekomst kan een dergelijke normering ingezet worden om ruimtelijke verschillen in chloridetolerantie van natuur in Laag-Nederland weer te geven. Een dergelijke kaart, gekoppeld aan gegevens over waterkwaliteit en aanvoerroutes van water, kan ingezet worden om voor individuele gebieden bedreigingen weg te nemen en kansen te creëren.

Effect van duur van zoutpuls op soorten

Kennis ontbreekt over het effect van variatie in duur van een chloridepiek op natuurdoeltypen en habitatrichtlijnsoorten. In samenhang hiermee blijkt uit de beschikbare kennis-tabellen Paulissen *et al.* (2007) dat slechts zeer weinig bekend is over de maximale duur van een chloridepiek vóórdat significante schade aan natuurdoeltypen of soorten optreedt.

Uitspoeltijd na (tijdelijke) verzilting

Kennis ontbreekt over de uitspoeltijd van zout voor individuele natuurtypen (beheertypen, habitattypen). De beschikbare hersteltijden (paragraaf 5.3) zijn in feite geschatte ontwikkelingstijden voor natuurtypen. Er is weinig bekend over de tijd die het duurt voordat zout is uitgespoeld uit een bepaald natuurtype. Dit uitspoeling van zout (of zoet) water is echter een tweede belangrijke component van de hersteltijd, naast de ontwikkelingstijd. Deze 'uitspoeltijd' is afhankelijk van de hydrologie en kan van gebied tot gebied verschillen. Naar verwachting zijn generalisaties mogelijk op het niveau van natuurtypen of categorieën van (hydrologisch) verwante natuurtypen.

Ecohydrologie beter meenemen in advisering bij zoet-zout dynamiek

Het advies wordt meegegeven om ecohydrologie op het niveau van natuurtype en op gebiedsniveau in beschouwing te nemen. Het is belangrijk rekening te houden met ecohydrologische verschillen tussen natuurtypen (en daarbinnen tussen verschillende natuurgebieden). Hierbij kan worden gedacht aan puur hydrologische verschillen (herkomst en aanvoerroute water, lokale hydrologie) en aan ecohydrologische verschillen (hoe diep wortelt een soort, zitten de wortels in een zoetwaterlens of wortelen ze in dieper liggend brak water, enz.). De huidige kennistabellen die een eerste aanzet voor vormen het afwegingskader zijn gebaseerd op globale, beperkt onderzochte aannamen. Om deze reden verdient het in veel gevallen de

13 Ellenbergwaarden zijn een systeem van ecologische indicatoren die worden gebruikt om de milieumomstandigheden van planten in verschillende habitats te beschrijven. Men maakt gebruik van getallen maar het is een nominale schaal (rangschikking). Dit systeem helpt ecologen om de ecologie van plantengemeenschappen beter te begrijpen en om milieukwaliteit en veranderingen in ecosystemen te monitoren.

aanbeveling om de ecohydrologische relaties nader te onderzoeken zodat een scherper beeld ontstaat op de daadwerkelijke risico's.

Effecten van sulfaat en chloride beter scheiden

Verder is het belangrijk het effect van sulfaat op flora en fauna beter te onderscheiden van het effect van chloride. Zoute en brakke wateren hebben niet alleen hoge chlorideconcentraties, maar ook hoge sulfaatconcentraties. Sulfaat kan sterk negatieve effecten hebben op ecosystemen en individuele planten- en diersoorten. Deze ongewenste effecten worden veroorzaakt door sulfidotoxiciteit en interne eutrofiëring als gevolg van sulfaatreductie (Lamers, 2001).

Mate van verzilting van de wortelzone

In een meer recente promotiestudie (Stofberg, 2017) over zout in natuurgebieden wordt gekeken naar wat er gebeurt als oppervlaktewater in polders met natuurgebieden (beperkt) zouter wordt. Hieruit is gebleken dat de plantensoorten aan de drijvende randen van de wortelmatten waarschijnlijk blootgesteld worden en dat hun groei hierdoor vermindert. Zoutstress treedt bij deze soorten op bij lagere concentraties dan eerder werd gedacht. Als kennishiaat voor natuurgebieden noemt deze promotiestudie dat het onvoldoende duidelijk is hoe verzilt water de wortelzone kan bereiken. Daarnaast is er ook weinig bekend over het mogelijke effect van zout op natuurlijke vegetatie.

De kennislacunes kunnen grotendeels worden opgevuld door experimenteel werk. Hierbij kan gedacht worden aan meso cosmos experimenten waarin plaggen met vegetatie, inclusief doelsoorten, uit specifieke natuurtypen worden blootgesteld aan water met variërende concentraties chloride en sulfaat. De verkregen resultaten kunnen via ruimtelijke (model) studies worden ingezet en opgeschaald om knelpunten en kansen als gevolg van verzilting te analyseren.

5.5 SAMENVATTING MET ZAKEN DIE RELEVANT ZIJN VOOR HET AFWEGINGSKADER

Op basis van het kennisoverzicht over de effecten van de zoet-zout dynamiek en de hersteltijd kan worden geconcludeerd dat er diverse kennishiaten zijn voor terrestrische natuur. Er bestaan correlaties met het voorkomen van plantensoorten c.q. soortengroepen, maar enig voorbehoud is noodzakelijk omdat de gegevensbasis beperkt is. De onevenwichtige opbouw van de beschikbare kennis, die de basis vormt voor de indeling naar zoutgehalte, kan leiden tot verkeerde conclusies (bijvoorbeeld het ten onrechte karakteriseren van soorten als obligaat zoet). Een indeling in vaatplanten naar zoutminnende, zouttolerante en zoutintolerante soorten is gegeven in bijlage IV. Een koppeling met fauna en zoutgehalte is vaak lastiger door (1) de hogere mobiliteit van diersoorten, (2) geringere afhankelijkheid van de standplaats en (3) gebrek aan gegevens. Vandaar dat de focus voornamelijk nog veelal ligt op de koppeling tussen plantensoorten en milieucondities.

Er is een rapport dat ingaat op de hersteltijd van natuurdoeltypen, maar dit is het resultaat van een deskundigenoordeel en roept vragen op. Zo is er voor veenmosrietland een hersteltijd aangegeven van 3 tot 10 jaar, terwijl aanpalende ecosysteemtypen zoals natte heide (moerasheide), trilveen en nat schraalland een veel langere hersteltijd krijgen. Het is niet duidelijk waarom de hersteltijd voor veenmosrietland zoveel korter is. Veel typen hebben ook eenzelfde bandbreedte of een erg brede bandbreedte waardoor de indeling weinig differentiërend is. Het overzicht laat niet een sterke relatie zien tussen enerzijds gevoeligheid voor verzilting en anderzijds de hersteltijd.

Op basis van de beschikbare informatie is het wel mogelijk om een aanzet te maken voor een afwegingskader zoet-zout inlaat bij terrestrische systemen. Als het gaat om een risico inschatting is het relevant om onderscheid te maken in:

- de biotische gevoeligheid voor zoutgehalte van het natuurdoel in de uitgangssituatie;
- de abiotische gevoeligheid van het systeem voor een verandering in zoutgehalte. Die verandering kan optreden via het grondwatersysteem en/of via het oppervlaktewater-systeem (inlaat);
- de omvang van de verstoring (verzilting/verzoeting) of een fysieke ingreep (bijvoorbeeld: damwand die brakke kwel vermindert).

De biotische gevoeligheid is afgeleid van de milieuranges voor chloride voor verschillende doeltypen (zie tabel 5.3 en tabel 5.4). Zo zijn er systemen obligaat zoet en kwetsbaar voor verzilting. Daarnaast zijn er doeltypen die juist samenhangen met hoge chloridegehalten en zullen veranderen onder invloed van verzoeting. Naast het type natuurdoel is ook de kwaliteit relevant.

Een goed ontwikkeld natuurdoeltype bevat een groot aantal zeldzame soorten. Dergelijke soorten zijn vaak gevoelig en een ongunstige verstoring kan daardoor een groot effect hebben op de kwaliteit (sterke afname doelsoorten). Hetzelfde natuurdoeltype met een slechte kwaliteit zal veelal zijn samengesteld uit de meest robuuste doelsoorten. Dat maakt het type minder gevoelig voor verslechtering (minder sterke afname in aantal doelsoorten) maar het risico op het geheel verdwijnen van het natuurdoeltype is groter vanwege het nog gering voorkomen van doelsoorten.

In het kader van verzilting stellen we dat een grenswaarde van ≤ 150 mg Cl/l gelijk staat aan 'gevoelig' voor invloeden van zout. Een grenswaarde tussen de 150 en 1.000 mg Cl/l beschouwen we als 'matig tolerant' en een grenswaarde ≥ 1.000 mg Cl/l beschouwen we als 'tolerant' voor invloeden van zout.

De abiotische gevoeligheid hangt af van de werking van het watersysteem en de eigenschappen van de bodem. Bij de werking van het water- en bodemsysteem gaat het om:

- de *verblijftijd* (als maat voor de *isolatie* van een deel) in het watersysteem. Normaliter wordt een korte verblijftijd geassocieerd met < 3 dagen en een lange verblijftijd met > 21 dagen. Deze waarden zijn echter gebaseerd op processen met fosfaat en algengroei. Voor chloride is verblijftijd vooralsnog een kennishiaat en hanteren we de bestaande vuistregels voor algengroei;
- de aanwezigheid van (of potentie op) *brakke kwel*. Het grondwater kan door vroegere of recente invloed van de zee verhoogde zoutgehalten hebben. Zeer schoon, zoet grondwater heeft een chloridegehalte van < 18 mg Cl/l. Het zoutgehalte van ondiep grondwater is in veel gebieden verhoogd door de landbouw (35-75 mg Cl/l). Dit is nog steeds zoet, maar wel vervuild. Als het gehalte > 300 mg Cl/l is dan spreken we van licht brak water. Het zoutgehalte kan in sommige gebieden oplopen tot 4.000-5.000 mg Cl/l (sterk brak);
- de *dichtheid aan sloten* (land-water interface). Als er veel land-water overgangen zijn, dan kan oppervlaktewater in potentie een groot areaal van het land beïnvloeden. Als maat voor een hoge dichtheid aan sloten wordt gedacht aan de gemiddelde situatie in veengebieden waar het wateroppervlak vaak groter is dan 5 % van het totale oppervlak. Een andere maat is de slootlengte die in veengebieden groter kan zijn dan 200 m per ha;
- de hydraulische weerstand van de bodem (met name *intreeweerstand* sloten). De waterdoorlatendheid van de bodem is ook van invloed op de mate waarin oppervlaktewater de bodem kan binnendringen en in potentie de wortelzone van terrestrische systemen

kan beïnvloeden. De hydraulische weerstand van bodems is goed onderzocht en die is voor veen en kleigronden aanzienlijk groter dan voor zandbodems. In watergangen is vaak de weerstand wat hoger door de aanwezigheid van slib. Hier spreekt men over intree weerstand en deze is vaak onbekend en wordt geschat ten behoeve van geohydrologische modellering. De weerstand in zandbodems voor intree van oppervlaktewater naar de percelen kan daardoor hoger zijn dan verwacht op basis van de hydraulische weerstand;

- noodzaak voor *bevloeiing*. Sommige natuurdoeltypen zijn afhankelijk van bevloeiing met oppervlaktewater voor hun voortbestaan. Dat geldt bijvoorbeeld voor blauwgraslanden en trilvenen in infiltratiegebieden. Normaliter vinden we dergelijke typen op locaties met kwel, maar deze kunnen onomkeerbaar zijn omgeslagen naar infiltratie als gevolg van verdroging. Door in de winterperiode dergelijke percelen te bevloeien met geschikt water, kunnen deze doeltypen toch met een goede kwaliteit vóórkomen. Dergelijke systemen zijn zeer gevoelig voor inlaat met ongeschikt (bijvoorbeeld: te zout) water en daardoor zeer kwetsbaar. Vooral bevloeiing tijdens het groeiseizoen is funest.

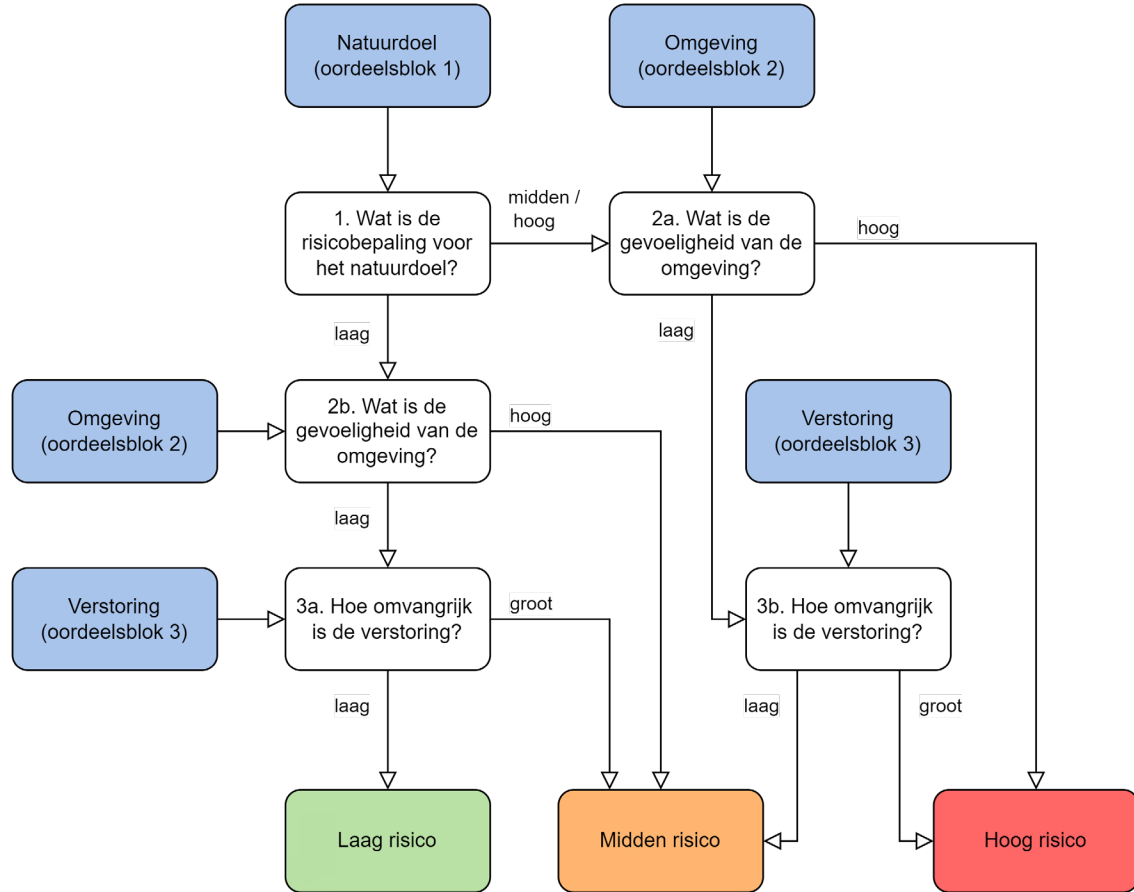
Verder is het risico nog afhankelijk van de aard en grootte van de verstoring. Voor ecosystemen die vanuit biotisch en abiotisch opzicht gevoelig zijn kan een relatief kleine verstoring al grote effecten hebben. Voor ecosystemen met een lage gevoeligheid zal de verstoring fors dan wel omvangrijk moeten zijn, wil hier echt een effect optreden. De vraag is alleen: *wat is omvangrijk?* Hiertoe kunnen verschillende aspecten relevant zijn:

- gemiddelde duur: duurt de verstoring lang of kort (<3 dagen)?
- frequentie: gaat het om een eenmalige gebeurtenis waarna het systeem kan herstellen of treedt het vaker op?
- interval: is de periode tussen twee opeenvolgende verstoringen korter of langer dan de hersteltijd van een ecosysteem?
- timing: treedt de ingreep op in het groeiseizoen (apr-okt) of vindt het in de winterperiode plaats wanneer er minder ecologische effecten te verwachten zijn?
- concentratie: is er sprake van een zeer sterke verhoging (of verlaging) van het zoutgehalte?
- omvang: heeft de verstoring betrekking op een relatief groot gebied of gaat het om een klein areaal?

Het is lastig om hiervoor vaste beslisregels te geven. De verstoring is te systeem-afhankelijk waardoor het niet mogelijk is duidelijke grenswaarden aan te geven. Dit zal per geval moeten worden beoordeeld.

Bovenstaand is samengebracht in een stroomschema dat, gebruikmakend van de tabellen uit dit hoofdstuk, een risicobepaling geeft per beheer- of habitatype in de huidige situatie en een toekomstige (zoetere of zoutere) situatie.

AFBEELDING 5.2 STROOMSCHEMA VOOR BEOORDELING TERRESTRISCHE NATUUR. RELEVANT IS DE BEOORDELING VAN HET NATUURDOEL (BIOTISCHE GEVOELIGHEID UITGANGSSITUATIE), DE OMGEVING (ABIOTISCHE ASPECTEN UITGANGSSITUATIE) EN DE AARD VAN DE INGREEP (TOEKOMSTIGE SITUATIE), ZOALS IN PARAGRAAF 5.5 TOEGELICHT. DE BLAUWE BLOKKEN ZIJN BENODIGDE INVOERPARAMETERS DIE RESULTEREN UIT DE EERSTE DRIE OORDELSBLOKKEN. DE WITTE BLOKKEN ZIJN HET STAPPENPLAN EN DE STOPLICHTBLOKKEN ONDERAAN ZIJN DE RESULTERENDE RISICO-BEPALINGEN. DIT STROOMSCHEMA WORDT PER GESELECTEERD NATUURDOEL DOORLOPEN



6

LANDBOUW

6.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de kennis over de effecten van zout op de landbouw. De vragen die centraal staan in dit hoofdstuk zijn:

- wat zijn de effecten van zoet-zout dynamiek en bijbehorende neveneffecten op de landbouw?
- wat is de hersteltijd?

Hierbij bespreken we eerst de effecten van irrigatie op de bodem in relatie tot de doelgewassen (paragraaf 6.2). Irrigatie kan namelijk de belangrijkste bron van verzilting zijn, in het geval van landbouwgewassen, en de manier hoe de bodem reageert op verzilting is bepalend voor het bepalen van effecten op de gewassen. Vervolgens gaan we nader in op de effecten van kortstondige blootstelling aan zout op de doelgewassen (paragraaf 6.3). Hierna volgt een beschrijving van de effecten op planten specifiek tijdens verschillende ontwikkelingsstadia en wat dit betekent voor de zouttolerantie van de doelgewassen (paragraaf 6.4). De kennishiaten die uit het kennisoverzicht naar voren komen, worden gepresenteerd in paragraaf 6.5, gevolgd door een samenvatting met de zaken die relevant zijn voor het afwegingskader in paragraaf 6.6.

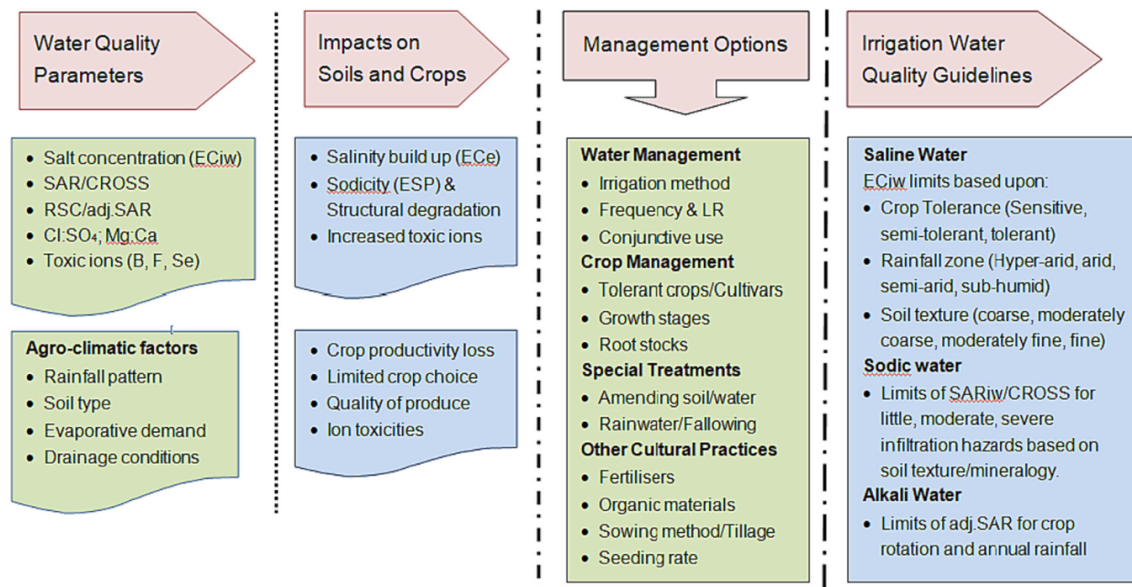
6.2 EFFECTEN VAN IRRIGATIE OP DE BODEM EN DOELGEWASSEN

Landbouwgewassen komen met name in aanraking met zout water door irrigatiewater. In deze paragraaf leggen we de focus op hoe het irrigatiewater de bodem beïnvloedt, het medium waar de doelgewassen in groeien. In de latere paragrafen lichten we toe hoe deze effecten, en irrigatie met verzilt water direct op het blad, de doelgewassen beïnvloeden.

In paragraaf 3.4.2 is toegelicht dat de bodemsamenstelling uitmaakt voor hoe een gebied reageert op verzilting. Hierbij zijn er een aantal facetten naar voren gekomen die belangrijk zijn om de effecten van verzilting in theorie te kunnen duiden. Dit zijn parameters zoals het waterbergend vermogen, de mate van infiltratie en de veldcapaciteit (Minhas en Qadir, 2024). Als zout in de bodem terecht komt, kan er structuurschade van de bodem optreden en kunnen een of meerdere van deze parameters veranderen. Dit beïnvloedt op z'n beurt weer de bewortelbaarheid, de beluchting en de bewerkbaarheid van de bodem. Dit heeft weer een weerslag op hoe goed de doelgewassen kunnen groeien. Het is daarom belangrijk te bepalen onder welke zoutconcentraties en in welke mate structuurschade optreedt. Ook de duur en tijdstip in het seizoen van de zoutblootstelling is van belang. Hier wordt dieper op in gegaan in paragraaf 6.3 en 6.4.

Het effect van irrigatie met water met een verhoogde zoutconcentratie is echter niet eenduidig weer te geven. Diverse factoren spelen hierbij een rol. afbeelding 6.1 uit de publicatie van Minhas en Qadir (2024) geeft dit mooi weer. Niet alleen diverse waterkwaliteitsparameters zijn van belang, maar ook agro-klimatologische factoren, de bodem en de gewassen bepalen de uiteindelijke teeltstrategie en de richtlijnen.

AFBEELDING 6.1 ILLUSTRATIE VAN DE LOCATIE-SPECIFIEKE RICHTLIJNEN VOOR DE WATERKWALITEIT VOOR IRRIGATIE (UIT MINHAS EN QADIR, 2024)



De zoutshade door irrigatie hangt sterk af van de voorgeschiedenis (status wortelzone vóór irrigatie) en de toekomst (blijft het droog?). In het rapport van Van Bakel en Stuyt (2011) wordt aangegeven dat het verband tussen het chloridegehalte in de wortelzone en van het irrigatiewater onder andere afhangt van:

- begintoestand van het chloridegehalte in de wortelzone;
- historie van irrigatie, natuurlijke neerslag en verdamping ('begintoestand vochtpercentage' in de wortelzone);
- waterbergingseigenschappen van de wortelzone;
- de manier van irrigatie;
- eventueel optreden van percolatie of capillaire opstijging.

De mate van droogte is erg bepalend voor hoe zout de bodem wordt wanneer er met een bepaald zoutgehalte wordt geïrrigeerd. Dit pleit voor afschaffing van de streefwaarden c.q. normen voor chlorideconcentraties in het beregeningswater c.q. in het oppervlaktewater (Van Bakel en Stuyt, 2011).

DOORSPOELING (DOORDRINGING VAN WATER IN DE BODEMLAGEN)

Het is dus lastig om een zoutnorm te koppelen aan irrigatiewater. Ook de hoeveelheid water dat gebruikt wordt, is uiteraard van belang. Door het gebruik van zout water kan er ook zoutophoping plaatsvinden. Dit hangt weer nauw samen met de mate van doorspoeling (hoeveel water ook doordringt in de bodemlagen onder de wortelzone). Als de doorspoelfractie laag is (<20 %) dan zal zoutophoping plaatsvinden. Bij een doorspoelfractie van 20 % kan de bodemzoutconcentratie gelijk blijven aan die van het irrigatiewater (zie tabel 10 in FAO&ICBA, 2023) of tot 30 % hoger uitpakken (Ayers en Westcot, 1985). In Nederland gaan Roest *et al.* (2003) er echter vanuit dat de norm voor irrigatiewater een factor 3 lager ligt dan de zouttolerantiernorm van het gewas bij een doorspoelpercentage van 20 %. Dit wijkt daarmee sterk af van de internationale literatuur. Bij een hogere doorspoelfractie is het sowieso mogelijk om ervoor te zorgen dat het zoutgehalte van de bodem niet hoger is dan het zoutgehalte van het irrigatiewater (Ayers en Westcot, 1985). Dit is ook aangetoond onder gecontroleerde omstandigheden op een zandbodem in Nederland (De Vos *et al.*, 2016).

De doorspoelfractie is vooral relevant wanneer er sprake is van regelmatige irrigatie met zout water. In de Nederlandse situatie wordt er voornamelijk berekend in periodes van droogte. Als er bijvoorbeeld 15 mm wordt geïrrigeerd met water van een EC van 3 dS/m wat 300 mg natrium per liter bevat, dan is dat al 45 kg natrium per ha dat via irrigatie in de bodem terecht komt. Bij een bodem die dicht tegen veldcapaciteit aanzit (hoog vochtpercentage), zal dit niet snel tot problemen leiden.

Als de bodem echter na irrigatie uitdroogt, dan zal het zout steeds geconcentreerder in het bodemvocht aanwezig zijn. Als er eenmaal met zoutwater is geïrrigeerd, dan is het dus vaak aan te raden om door te gaan met irrigatie totdat het weer voldoende gaat regenen. Als er tijdens een langere periode van droogte bijvoorbeeld 150 mm wordt geïrrigeerd dan is dat volgens bovenste som al 450 kg natrium per ha. Dit soort hoeveelheden natrium kunnen niet alleen voor zoutschade aan het gewas leiden maar ook tot een nutriëntengebrek in de plant en schade aan de bodemstructuur (paragraaf 3.4.2 en 3.5.1).

De mate van doorspoeling is ook afhankelijk van het bodemtype. In een zandbodem zal water altijd makkelijk infiltreren en makkelijk uitspoelen wanneer de hoeveelheid water groter is dan de veldcapaciteit. Ook zouten spoelen daarmee makkelijk uit. In een kleibodem is de infiltratiesnelheid en -capaciteit lager. Ook zullen de zouten eerder aan de kleideeltjes gebonden zijn. Door deze factoren spoelen de zouten minder makkelijk uit. De mate van infiltratie en mogelijke infiltratie problemen hangen nauw samen met de SAR waarde van het irrigatiewater (paragraaf 3.2.2).

In een recent artikel geven Minhas en Qadir (2024) een overzicht van de effecten van onder andere jaarlijkse neerslag hoeveelheden en bodemtype op de grenswaarden voor het gebruik van irrigatiewater. Dit resulteert in nieuwe richtlijnen voor het gebruik van zout water. In het artikel wordt onderscheid gemaakt tussen vier klimaatzones op basis van jaarlijkse neerslag, waarbij Nederland in de klimaatzone van 600 - 800 mm neerslag valt. In vergelijking met de droogste klimaatzone (<100mm) betekent dit dat de maximale EC- waarde die gebruikt kan worden voor irrigatie in Nederland, in de meeste gevallen een factor twee hoger ligt dan onder droge omstandigheden. Een beknopt overzicht van deze resultaten wordt gegeven in tabel 6.1.

TABEL 6.1 MAXIMALE EC-WAARDES VOOR HET GEBRUIK VAN IRRIGATIEWATER, ONDERVERDEELD VOOR BODEMTEXTUUR EN MATE VAN TOLERANTIE VAN HET GEWAS (OP BASIS VAN MINHAS EN QADIR, 2024; BIJ 600-800 MM JAARLIJKSE NEERSLAG)

Bodemtextuur (% klei)	Grondsoort	Tolerantie gewas	Maximale EC irrigatiewater	Maximaal chloridegehalte (mg Cl/l)
fijn (>30 % klei)	lichte tot zware klei	gevoelig	2,0	400
		matig tolerant	3,0	750
		tolerant	4,5	1.250
matig fijn (20-30 % klei)	zware zavel, licht klei	gevoelig	2,5	550
		matig tolerant	5,5	1.600
		tolerant	8,0	2.600
matig grof (10-20 % klei)	lichte tot zware zavel	gevoelig	3,0	750
		matig tolerant	7,0	2.200
		tolerant	8,5	2.800
grof (<10 % klei)	zand tot licht zavel	gevoelig	3,0	750
		matig tolerant	8,0	2.600
		tolerant	10,0	3.400

BESTAANDE CHLORIDENORMEN IN WATERSCHAPPEN

Stuyt *et al.* (2011) hebben gekeken naar de chloridenormen binnen diverse waterschappen in Nederland. Het is bekend dat er aanzienlijke, regio-gebonden verschillen zijn rond (potentiële) verzilting, en dat het waterbeheer hierop is toegesneden. Zo zijn er waterschappen die 200 mg Cl/l aanhouden als norm, maar ook 1.000 mg Cl/l. Een redelijk algemene trend tussen de waterschappen is het volgende: 200-300 mg Cl/l voor bollen en fruitbomen, 600 mg Cl/l voor akkerbouw en 1.000 mg Cl/l voor gras/veeteelt. Ook in een meer recente publicatie van Waterschap Hollandse Delta (Waterbeheerprogramma 2022-2027, publicatie uit 2021) komt een redelijk vergelijkbare norm naar voren (<1.000 mg Cl/l veeteelt, <600 mg Cl/l akkerbouw, <300 mg Cl/l groenteteelt, <200 mg Cl/l glastuinbouw). Voor de beheerdersrapportage is hier opnieuw rondvraag naar gedaan. De normen verschillen nog altijd aanzienlijk per waterschap, per waterlichaam en per gebruiksfunctie. Ook wordt niet overal een chloridenorm gehanteerd, maar sturen sommige waterschappen op EC-gehalte.

NORMEN VOOR DRINKWATER VEE

Voor veeteelt gaat het met name om de norm voor drinkwater voor vee. In Van Bakel en Stuyt (2011) wordt hiervoor als bovengrens 2.000 mg Cl/l genoemd en in Counette (2022) wordt voor rundvee 250 mg Cl/l als goed aangemerkt en >2.000 mg Cl/l als slecht. Op veel plekken wordt er echter niet op het chloridegehalte gestuurd, mede omdat er slechts sprake is van een inspanningsverplichting (of er is daar niet eens sprake van).

GRENSWAARDEN TER ATTENTIE VAN BODEMTEXTUUR

Bodemtextuur heeft een grote invloed op het gebruik van zout water, doordat verschillende bodemtypes verschillende 'hydro-fysiologische' parameters hebben zoals waterretentie, mate van infiltratie en veldcapaciteit (Minhas en Qadir, 2024) (paragraaf 3.4.2). De 'Sodium adsorption ratio' (SAR) waarde wordt vaak gebruikt als indicatie voor mogelijke problemen met waterinfiltratie. Dit kan zowel voor de bodem als voor het irrigatiewater worden gebruikt. Minhas en Qadir (2024) hebben voor de SAR waarde van irrigatiewater nieuwe richtlijnen ontwikkeld (tabel 6.2).

TABEL 6.2 GRENSWAARDE VOOR DE SAR VAN IRRIGATIEWATER (SARIW) TEN AANZIEN VAN MOGELIJK INFILTRATIEPROBLEMEN (MINHAS EN QADIR, 2024). DE MOGELIJKE INFILTRATIEPROBLEMEN WORDEN IN DRIE KLASSEN INGEDEELD; MIMIMAAL, MIDDELMATIG, AANZIENLIJK

Bodemtextuur (% klei)	Grondsoort	Grenswaarde voor sariw voor mogelijke infiltratieproblemen		
		Minimaal	Middelmatig	Aanzienlijk
fijn (>30 % klei)	lichte tot zware klei	<6	6 - 10	>10
matig fijn (20-30 % klei)	zware zavel, licht klei	<8	8 - 12	>12
matig grof (10-20 % klei)	lichte tot zware zavel	<10	10 - 15	>15
grof (<10 % klei)	zand tot licht zavel	<10	10 - 20	>20

Op basis van tabel 6.2 wordt bijvoorbeeld een minimaal probleem verwacht als een fijne bodem (>30 % klei) wordt geïrrigeerd met water met een SARIW waarde van kleiner dan 6, terwijl een waarde groter dan 10 aanzienlijke problemen met infiltratie kan veroorzaken. Deze mogelijke infiltratieproblemen hangen nauw samen met de mogelijke verslemping van de bodem (Kader 6.1). Meer recent wordt steeds vaker gebruik gemaakt van de zogehete CROSS waarde (Cation Ratio of Soil Structural Stability) in plaats van de SAR waarde. Deze CROSS waarde lijkt beter in staat om de mogelijke effecten op bodemstructuur in te schatten (Rengasamy & Marchuk, 2011).

KADER 6.1 VERSLEMPING VAN DE BODEM TEN GEVOLGE VAN IRRIGATIE

Verslemping of slemp is het proces waarbij bodemaggregaten uiteenvallen en de poriën in de bodem verstopt raken. In een bodem met een goede structuur zijn bodemaggregaten sterk gebonden door calcium en organische stof. Een hoge natriumconcentratie (hoge SAR waarde) in het irrigatiewater of in de bodem kan ervoor zorgen dat natrium (maar ook magnesium) calcium in het klei-humus complex verdringt. In bodems met een hoog kleipercentage zorgt dit ervoor dat de kleideeltjes dichter op elkaar komen te zitten. Hierdoor worden de bodemporiën kleiner en wordt het lastiger voor wortels, maar ook voor water en lucht om goed de bodem in te dringen. Ook is de binding van natrium in het klei-humus complex minder sterk dan met calcium. Hierdoor vallen bodemaggregaten sneller uit elkaar. Dit kan bijvoorbeeld door de inslag van regendruppels gebeuren, waarbij de kleinere bodemdeeltjes (klei en silt) dan niet alleen poriën verstoppert (bodemverdichting), maar er ook een korst op de bodem vormt (na drogen) die gas uitwisseling en kieming bemoeilijkt. Verslemping komt vooral voor op gronden met 10 tot 20 % klei (bron: website Eurofins Agro).

Een goede calcium bezetting in het klei-humus complex, en voldoende organische stof, zorgen voor een stabiele bodemstructuur (stabiele bodemaggregaten) die minder gevoelig voor verslemping is. Meer informatie is onder andere te vinden in de publicatie van Pelgrum (1963).

De mate waarin de SAR/CROSS waarde een mogelijk effect heeft op de bodem is ook afhankelijk van de zoutconcentratie van de bodem (FAO & ICBA, 2023). Een bodem met een hogere zoutconcentratie kan namelijk een hogere SAR/CROSS waarde verdragen zonder negatieve effecten op de bodemstructuur/waterinfiltratie.

In het algemeen geldt dat irrigatie direct op/in de bodem de voorkeur geniet over beregening wanneer het irrigatiewater een verhoogde EC-waarde heeft. Er is dan minder kans op verslemping en bladschade door de directe opname van zout via het blad wordt voorkomen.

6.3 EFFECTEN VAN KORTE BLOOTSTELLING AAN ZOUT OP PLANTEN

De (meeste) onderzoeken naar de effecten van korte blootstelling aan zout op gewassen zijn uit de jaren 80 van de vorige eeuw. De meer recente onderzoeken over korte versus lange blootstelling aan zout gaan vaak over korte blootstelling aan water- of kustplanten, veelal in de buitenlandse literatuur. Alhoewel dit niet direct relevant is voor de akker- en tuinbouw, kan het wel ecologische gevolgen hebben en daarom worden hieronder toch een paar studies kort besproken.

KORTE BLOOTSTELLING AAN ZOUT

Lauer *et al.* (2011) hebben bijvoorbeeld gevonden dat blootstelling van 24 uur aan verhoogde zoutwaarden in *Vallisneria americana* (een diepwortelende waterplant in de zee) tot oxidatieve stress op celniveau leidt, ondanks dat de plant bekend staat als (redelijk) zouttolerant (Doering *et al.*, 1999; Boustany *et al.*, 2010). Senavirathna *et al.* (2020) hebben ook gekeken naar de effecten van een korte blootstelling aan verschillende zoutgehalten aan twee soorten (zoet)waterplanten en vinden dat er in de ene soort oxidatieve stress ontstaat, maar in de andere soort niet. Ze hebben naar verschillende cellulaire responsen gekeken en vinden in de meeste gevallen dat

de twee onderzochte soorten anders reageren. We kunnen dus niet een universele respons definiëren die voor alle soorten aangeeft in welke mate de plant stress ervaart.

De geitenhoefwinde (*Ipomoea pes-caprae*) is een landplant maar groeit op het strand in (sub)tropische gebieden. Voor deze plant geldt dat hoe hoger de plotselinge zoutconcentratie waaraan hij wordt blootgesteld is, hoe langer het duurt voordat hij zich heeft aangepast (Suarez, 2011). Echter, het is een kustplant dus het is niet echt een verrassing dat de plant het vermogen heeft zich aan te passen. Shoukat *et al.* (2020) hebben gekeken naar korte en langdurige blootstelling aan zout in *Phragmites karka*, ook een (sub)tropische plant, familie van riet (*Phragmites australis*). Deze plant had geen last van een korte (0- 7 dagen) blootstelling aan een matige zoutconcentratie (100 mM NaCl) maar wel van een korte blootstelling aan een hogere zoutconcentratie (300 mM NaCl). Wanneer de planten langdurig aan deze zoutconcentraties werden blootgesteld, verminderde de groei bij de matige zoutconcentratie en gingen de planten dood bij de hogere. Verder is het in sommige gevallen zo dat een tijdelijke blootstelling aan een lage zoutconcentratie de plant in staat stelt om later in de ontwikkeling een zoutconcentratie te overleven die anders lethaal zou zijn (Nissim, 1997).

Ten slotte is bij tomaat vastgesteld dat de plant selectief water opneemt als deze de keuze heeft tussen water met een lagere zoutconcentratie en water met een hogere zoutconcentratie. De plant neemt water op met de wortels die zich in het minst zoute milieu bevinden (Tzohar *et al.*, 2021).

GELEIDELIJKE TOENAME VS. PLOTSSELINGE BLOOTSTELLING ZOUT

Naast deze voorbeelden over zoutschokken en selectieve wateropname, is het van belang om een onderscheid te maken tussen plotselinge blootstelling aan zout (zoutschok) of een meer geleidelijke ophoging van zouten in de wortelzone (zoutstress). Verschillende studies laten zien dat bijvoorbeeld de genexpressie patronen heel anders zijn in beide situaties. Dit geldt voor een reeks verschillende plantensoorten (Shavrukov 2012; Skorupa *et al.*, 2019). Echter, een zoutschok zoals in aan laboratorium zal in de praktijk onder veldomstandigheden niet vaak voorkomen en is daarom ook minder relevant.

ZOUTTOLERANTIE ALS FUNCTIE VAN GROEIOMSTANDIGHEDEN

De tolerantie (van een korte zoutpiek) van een gewas hangt af van groeiomstandigheden zoals temperatuur, beschikbaarheid van water en de verdampingsvraag. Onder gematigde meteorologische omstandigheden (situatie Nederland) zal minder snel sprake zijn van remming van de wateropname in de wortelzone ten gevolge van zout dan onder aride omstandigheden (terwijl veel data over zouttolerantie wel uit aride gebieden komen) (Van Bakel en Stuyt, 2011). Dit hangt dus nauw samen met de waterbehoefte (verdampingsvraag) van het ontwikkelingsstadium van het gewas. Ook is de verdamping zelf van belang. In het voorjaar zal de verdamping minder zijn dan tijdens de zomer. De verdampingsvraag is dus een combinatie van het ontwikkelingsstadium van het gewas en de actuele verdamping door de actuele klimatologische omstandigheden.

ZOUTTOLERANTIE ALS FUNCTIE VAN IRRIGATIETECHNIEK

De manier van irrigatie is voor fruitteelt, sierteelt en bladgewassen bepalend. Irrigatie direct op het blad kan leiden tot bladschade en daarmee tot een acute waardevermindering van het gewas. Voor andere doelgewassen is dit effect op waardevermindering veel minder tot niet aanwezig.

TABEL 6.3 ZOUTTOLERANTIE VAN DE VERSCHILLENDE DOELGEWASSEN OP BASIS VAN LITERATUUR EN KANS OP ACUTE WAARDEVERMINDERING DOOR GEBRUIK VAN SPRINKLERIRRIGATIE

Gewas(groep)	Zouttolerantie	Kans op acute waardevermindering bij sprinklerirrigatie
Engels raaigras	matig tolerant	laag
(snij)mais	gevoelig	laag
aardappel	matig tolerant	laag
(zomer)tarwe	matig tolerant	laag
gerst	tolerant	laag
suikerbiet	tolerant	laag
ui	(matig) gevoelig	laag
tulp	(matig) gevoelig	hoog
peer	gevoelig	hoog
lelie	(matig) gevoelig	hoog
overige boomsoorten	gevoelig	hoog

IMPLICATIE VOOR LANDBOUWGEWASSEN

Al met al is er niet veel bekend over korte blootstelling aan zoutpieken, en nog minder over of, en zo ja hoe snel, planten kunnen herstellen; laat staan dat er iets bekend is over landbouwgewassen. Het beeld wat uit het literatuuroverzicht naar voren komt, is grotendeels intuïtief (de gevolgen voor een plant blootgesteld aan een verhoogde zoutconcentratie hangt af van hoe extreem de zoutpiek is en hoelang deze duurt). Desondanks zal het ene gewas anders reageren dan het andere en is het meeste onderzoek gedaan naar relatief zouttolerante planten of aan waterplanten. Hier ligt dus duidelijk nog een kennishiaat voor wat betreft de gevolgen aan landbouwgewassen van een relatief korte blootstelling aan verschillende zoutgehalten.

6.4 EFFECTEN VAN ZOUT OP PLANTEN IN VERSCHILLENDE ONTWIKKELINGSSTADIA

De effecten van zout op een plant zijn afhankelijk van de ontwikkelingsstadia van de plant. Over het algemeen geldt dat hoe jonger de plant, hoe gevoeliger deze is voor de blootstelling aan zout (Munns en Tester, 2008).

KIEMING

Het eerste stadium in de levenscyclus van een plant is de kieming van een zaadje en dit is meestal het gevoeligste moment. Dit kan zelfs gelden voor halofyten, oftewel planten die van nature een zeer hoge zouttolerantie hebben (Houle *et al.*, 2001). Dit effect van zout op de kieming is echter omkeerbaar. Zaden die zijn blootgesteld aan zout kunnen vaak gewoon kiemen wanneer de omstandigheden beter zijn.

Naast variaties in zouttolerantie tussen gewassen bestaat er binnen een gewas (dus verschillende rassen) ook variatie in de zouttolerantie tijdens de kieming, zoals aangetoond voor pompoenen (Irik en Bikmaz, 2024) en peen (Zilt Proefbedrijf, 2017) (tabel 6.4). Ook Van Bakel en Stuyt (2011) geven aan dat veel kiemplanten gevoelig zijn voor zout en ze stellen voor om een harde grens van 500 mg Cl/l te hanteren voor de kieming. Maar in hetzelfde rapport is ook een tabel opgenomen waarbij de zouttolerantie van de kieming van diverse gangbare gewassen toch veel hoger lijkt te liggen dan 500 mg Cl/l. Deze tegenstrijdigheid legt bloot dat we nog onvoldoende weten over welke grens we per soort en ras dienen te hanteren. Ook het rapport van Van Bakel *et al.*, 2018 bevestigt dit beeld. In dat rapport wordt gesteld dat de kennis ontoereikend is om per gewas de relatie tussen zouttoestand in de wortelzone en de groeireductie per groeistadium te kwantificeren.

TABEL 6.4

KIEMINGSPERCENTAGES VAN PEEN (DIRECT GEZAAID IN DE VOLLE GROND) BIJ VERSCHILLENDE ZOUTCONCENTRATIES VAN HET IRRIGATIEWATER (OP BASIS VAN RESULTATEN ZILT PROEFBEDRIJF, 2017)

Dagen na zaaien	Zoutconcentratie irrigatiewater (in dS/m)					
	0,6	4	8	12	16	20
9	60	44	6	0	0	0
13	80	81	47	38	9	0
28	99	98	88	69	36	13

Op Texel zijn door het Zilt Proefbedrijf proeven gedaan rondom de kieming bij verschillende zoutconcentraties. In tabel 6.4 staan de resultaten beschreven van de kieming van peen (wortel) bij verschillende zoutconcentraties van het irrigatiewater. Op basis van deze resultaten lijkt er een vertraging van de kieming op te treden (na 9 dagen al 60 % kieming bij een EC van 0,6 dS/m, maar pas 44 % kieming met een EC van 4 dS/m). Dit verschil trekt echter na verloop van tijd bij, met 98 % kieming na 28 dagen bij een EC van 4 dS/m en 88 % bij een EC van 8 dS/m. In dit experiment is echter niet gekeken naar de effecten van zout op de eerste groeifase (zaailing fase), wat mogelijk wel relevant is.

OVERZICHT VERSCHILLENDE GROEIFASEN

In een persoonlijk commentaar van R.K. Singh (International Center for Biosaline Agriculture; ICBA), wie veel onderzoek heeft gedaan naar de zouttolerantie van rijst, kwam het volgende naar voren over de groeistadia van rijst. De kieming van rijst zelf is nog redelijk tolerant, maar de eerste 21 dagen direct na de kieming (zeg maar de 'zaailing fase') is wel gevoelig voor zout. Daarna kan rijst weer redelijk hoge zoutconcentraties aan (de late vegetatieve fase kan zelfs een EC van 12-14 dS/m verdragen), maar de bloeifase en eerste vruchtzetting is vervolgens wel weer gevoelig voor zout. De zaadrijpingsfase is weer een stuk minder gevoelig voor zout. In dit voorbeeld zijn er dus twee ontwikkelingsperiodes die heel specifiek gevoelig zijn voor zout. Het is niet uitgesloten dat dit ook voor verwante soorten als tarwe en gerst geldt.

In tabel 6.5 is een poging gedaan om, op basis van het deskundigenoordeel van The Salt Doctors, een overzicht te geven van de zouttolerantie tijdens verschillende groeistadia van de doelgewassen. In het rapport van Van Bakel et al., 2018 wordt zelfs uitgegaan van 10 verschillende groeistadia van een gewas. In tabel 6.5 gaan we uit van maar vier fases. Kort gezegd willen we nagaan wat het mogelijke effect is van een verhoogde zoutconcentratie rondom de kieming en eerste groei (zaailing fase), de eindfase (afrijping en oogst) en de fase er tussenin (vegetatieve groei). Dit is dus een versimpeling van de werkelijkheid (als die in totaal 10 groeifases heeft) en is vooral bedoeld als indicatie voor het effect van irrigatie in het vroege voorjaar (in de meeste gevallen de kiem- en zaailingfase) en in de zomer (in de meeste gevallen de vegetatieve fase).

TABEL 6.5 ZOUTTOLERANTIE TIJDENS VERSCHILLENDE GROEISTADIA (INDICATIE ZOUTTOLERANTIE OP BASIS VAN DESKUNDIGENoordeel THE SALT DOCTORS)

Gewas(groep)	Kieming	Zaailing fase	Vegetatieve groei	Eindfase
Engels raaigras	(matig) gevoelig	tolerant	tolerant	tolerant
(zomer)tarwe	matig tolerant	matig tolerant	matig tolerant	tolerant
aardappel	matig tolerant	matig tolerant	matig tolerant	matig tolerant
(snij)mais	gevoelig	gevoelig	gevoelig	gevoelig
suikerbiet	matig tolerant	tolerant	tolerant	tolerant
ui	gevoelig	gevoelig	gevoelig	(matig) gevoelig
(zomer)gerst	matig tolerant	tolerant	tolerant	tolerant
tulp	gevoelig	gevoelig	gevoelig	(matig) gevoelig
peer	n.v.t.	n.v.t.	gevoelig	gevoelig
lelie	gevoelig	gevoelig	gevoelig	(matig) gevoelig
overige boomsoorten	n.v.t.	n.v.t.	gevoelig	gevoelig

GROEIFASEN IN VERSCHILLENDE JAARGETIJDEN

De groeistadia van de gewassen treden op in verschillende jaargetijden. Zo zal Engels raaigras vaak voorkomen op 'meerjarige' percelen en zal de kieming minder relevant zijn; het gewas staat er immers al. De vegetatieve fase zal vooral in de periode april-september zijn, als het gras meerdere keren worden gesneden/geoogst. Zomertarwe en zomergerst worden meestal half januari tot half april ingezaaid en februari tot eind april, respectievelijk. In de meeste gevallen worden beide gewassen dus ingezaaid in een periode waarin weinig droogte wordt verwacht (net na de winter in het vroege voorjaar, in principe een periode van neerslagoverschot) en dus zal de zoutblootstelling in deze fase in de meeste gevallen verwaarloosbaar zijn. Ui en suikerbiet wordt wat later geplant, meestal in maart of april, en in de meeste gevallen zal er ook dan nog weinig vraag naar irrigatie zijn. Voor aardappel en mais geldt meestal een later zaai-/plantdatum, zo rond half april tot begin mei (afhankelijk van mogelijke nachtvorst).

Tulpen worden in het najaar geplant en de vegetatieve fase vindt al in het vroege voorjaar plaats. In het algemeen zal de mogelijke blootstelling aan zout, door irrigatie of door capillaire opstijging van zout grondwater, plaatsvinden tijdens droogte. Tulpen worden vaak al vroeg in het jaar beregend, wat samenvalt met de vegetatieve groeifase. Ook uien worden met regelmaat al vroeg in het jaar beregend, wat in dat geval vaak samenvalt met die kiemfase en zaailingfase. Dus alhoewel er in tabel 6.4 een onderscheid gemaakt wordt tussen verschillende groeistadia, zullen in de praktijk maar één of twee groeistadia mogelijk worden blootgesteld aan zout.

Capillaire opstijging is naar alle waarschijnlijkheid alleen relevant rond de piek van het neerslagtekort (meestal augustus/september. Irrigatie kan plaatsvinden in het vroege voorjaar, in de zomer en zelfs rond de oogstperiode indien de bodem te droog is.

6.4.1 DREMPELWAARDES VOOR DE ZOUTTOLERANTIE VAN DE DOELGEWASSEN

Er gelden diverse normen/richtlijnen voor chlorideconcentraties tussen verschillende waterschappen. Vaak wordt voor grasland/veeteelt de hoogste concentratie aangehouden, alhoewel vaak niet duidelijk is of dit geldt voor de zouttolerantie van gras of dat dit de norm voor drinkwater voor vee is. Voor akkerbouw wordt vaak 600 mg Cl/l aangehouden, maar binnen de akkerbouw worden uiteraard diverse gewassen verbouwd, en elk gewas heeft weer zijn eigen niveau van zouttolerantie (zie tabel 6.6). Deze drempelwaardes worden hieronder nader toegelicht.

TABEL 6.6 GERAPPORTEERDE GRENSWAARDEN WAARONDER JE GEEN OPBRENGSTDERIVING VERWACHT UIT STUYT *ET AL.* (2016) EN VAN DE FAO. DE WAARDEN VAN STUYT *ET AL.* (2016) ZIJN BETROUWBAARHEIDINTERVALLEN BEREKEND OP BASIS VAN VERSCHILLENDE GEPUBLICEEERDE GEGEVENS EN DE EENHEID IS IN MG CL/L VOOR GIETWATER. DE WAARDEN VAN DE FAO ZIJN DREMPELWAARDES IN DS/M VOOR DE BODEM (EN OMGEREKEND NAAR CHLORIDE M.B.V. TABEL 3.1

Gewas(groep)	Stuyt <i>et al.</i> (2016)	Annex 1, FAO	Overige literatuur	Zouttolerantie
Engels raaigras	600-10.000 ¹	1.650		(matig) tolerant
(snij)mais	200-1.300	300		gevoelig
aardappel	200-2.500	300	1.700-3.300 ⁶	matig tolerant
(zomer)tarwe	600-10.000 ²	1.800-2.600, 1.800 ³		(matig) tolerant
gerst	600-10.000 ²	2600		tolerant
suikerbieten	600-5.000	2200		tolerant
uien	250-1.200	1100 400	650-3.100 ⁷	(matig) gevoelig
tulpen	200-1.500	n/a ⁵		(matig) gevoelig
boomteelt	275-675			gevoelig

¹ Stuyt *et al.* (2016) rapporteert het interval voor 'grasland'.

² Stuyt *et al.* (2016) rapporteert het interval voor 'gerst en tarwe'.

³ Twee waarden worden gerapporteerd in de FAO lijst, beiden voor de soort *Triticum aestivum* L..

⁴ Twee waarden worden gerapporteerd in de FAO lijst, een voor de knolopbrengst (1,2 dS/m) en een voor de zaadopbrengst (1,0 dS/m).

⁵ De FAO lijst gaat alleen over voedselgewassen.

⁶ Bron: Van Straten 2021.

⁷ Bron: De Vos *et al.*, 2016, waarden zijn 90 % betrouwbaarheidsinterval voor de drempelwaarde, uitgedrukt als EC90.

NATRIUM ALS DREMPELWAARDE?

Voor de aquatische natuur, terrestrische natuur en ook veel in de landbouw spreken we over het zoutgehalte of het chloridegehalte als we de grootte van verzilting of verzoeting proberen uit te drukken. Het is echter van belang om te weten dat, in ieder geval voor de doelgewassen, niet zozeer het chloridegehalte, maar juist het natriumgehalte een belangrijke parameter is om te bepalen hoe schadelijk verzilting is, en in het verlengde daarvan, hoe dit doorwerkt op de landbouwopbrengst. In hoofdstuk 3 en in kader 6.1 is bijvoorbeeld aangegeven hoe natrium de bodemstructuur beïnvloedt door calcium te verdringen. Hierdoor neemt het bufferend vermogen af en nemen de netto negatieve effecten door verzilting op de doelgewassen toe. Het is daarom belangrijk dat natrium wordt meegenomen in het bepalen van een drempelwaarde waarboven effecten door verzilting significant worden.

Aangezien een EC-meting natrium al indirect meeneemt (zoals eerder aangegeven is natrium bij een EC-waarde groter dan 2 dS/m in de meeste gevallen al dominant), is het beter om naar de EC-waarde te kijken dan puur naar het chloridegehalte. Desondanks zijn chloridenormen vooralsnog leidend binnen de waterschappen. Vandaar dat in tabel 6.5 nog wel is uitgegaan van chloridegehalten in plaats van EC-waarden.

Het wordt wel geadviseerd om in de toekomst meer naar EC om te schakelen, omdat hierin natrium alsook het volledig osmotische potentiaal is meegenomen.

DREMPELWAARDES UIT DE LITERATUUR

Er bestaan verschillende modellen om de zouttolerantie van een gewas te beschrijven, maar het Maas-Hoffman model is het meeste in gebruik (drempel-helling model). Dit model gaat uit van een maximale zoutconcentratie waarbij nog geen effect optreedt (de drempelwaarde), en een maat voor hoe snel de opbrengst afneemt bij zoutconcentraties die hoger zijn dan de drempelwaarde (de helling). De twee parameters die de zouttolerantie beschrijven staan online gebundeld in een publicatie van de FAO (Annex 1. Crop salt tolerance data). Deze lijst dient vaak als standaardreferentie en ook in Nederland wordt deze lijst tot nu toe meestal als standaard gebruikt. Deze lijst is echter veelal gebaseerd op hele oude studies en gaat uit van de drempelwaarde op basis van de EC_e van de bodem. Zo is de informatie over de tolerantie

van een aardappel (EC-drempelwaarde 1,7 en helling van -12 %) gebaseerd op een publicatie uit 1951. Sinds die tijd zijn er verschillende studies die hebben aangetoond dat de tolerantie van in ieder geval sommige aardappelrassen flink hoger liggen, bijvoorbeeld in Van Straten *et al.* (2021) en De Vos *et al.* (2016).

Een andere bron die kennis over maximale zouttolerantie heeft gebundeld, is te vinden in Stuyt *et al.* (2016). Hier hebben de auteurs gepubliceerde zoutschade drempels op basis van het chloridegehalte in het irrigatiewater uit de literatuur samengebracht. Op basis van de verschillende gepubliceerde data hebben ze een interval berekend, waarbinnen de echte schadedrempel met 40 % zekerheid tussen ligt. Stuyt *et al.* (2016) laat enige overeenstemming zien met FAO. Zo zijn uien in beide publicaties gevoelig voor zout (en tulpen ook volgens Stuyt *et al.* (2016), wat overeenkomt met de algemene observatie dat de sierteelt erg gevoelig is voor zout), en zijn suikerbieten en grassen -ook gerst en tarwe- relatief tolerant.

De meer recente drempelwaardes in bijvoorbeeld Van Straten *et al.* (2021) en De Vos *et al.* (2016) liggen aanzienlijk hoger dan Stuyt *et al.* (2016) en FAO, alhoewel de grote spreiding in de intervallen van Stuyt en het relatief lage betrouwbaarheidsinterval van 40 % natuurlijk flinke ruimte biedt voor potentieel hoge drempelwaardes. Van Straten *et al.* (2021) rapporteren bijvoorbeeld voor bepaalde aardappelrassen een EC_{90} (de EC_e van de bodem waarbij nog 90 % van de opbrengst gerealiseerd onder zoete omstandigheden) van 7,8 dS/m.

In deze publicatie wordt ook een betrouwbaarheidsinterval berekend van 95 %, ditmaal op basis van schattingen van de EC_{90} op basis van meerdere jaren veldexperimenten met dezelfde rassen. Zelfs de meest gevoelige aardappelrassen hebben een ondergrens van dit 95 % betrouwbaarheidsinterval van ongeveer 3 dS/m. Dit is dus nog steeds hoger dan te verwachten op basis van de FAO gegevens (een drempelwaarde van 1,7 en een helling van -12 % geeft een EC_{90} van $\pm 2,7$ dS/m). Voor u zien we iets vergelijkbaars: de drempelwaardes voor ui (in dS/m) liggen hoger dan de getallen van de FAO. Dit was het meest tolerante ui-ras getest door de Vos *et al.* (2016). Dit suggereert dat, in ieder geval voor ui, het irrigatiewater mogelijk iets zouter kan dan tot nu toe gedacht.

Ondanks de duidelijke verschillen voor aardappelen en uien, blijft de meest rechtse kolom in tabel 6.6 (overige literatuur in aanvulling op Stuyt *et al.*, 2016, en FAO) grotendeels leeg. Dit komt voornamelijk omdat er niet vaak nieuwe drempelwaardes gepubliceerd worden. Dit heeft een aantal redenen.

- ten eerste worden de FAO waarden erg vaak gebruikt en gelden deze nog steeds als de standaard referentie;
- ten tweede is het moeilijk om betrouwbare drempelwaardes te verkrijgen: in het veld is er altijd veel variatie en gegevens uit laboratoria zijn misschien minder van toepassing op de praktijk;
- ten slotte is er een groeiend bewustzijn onder wetenschappers dat 'de' drempelwaarde van een gewas niet bestaat.

De voorbeelden in dit hoofdstuk laten duidelijke verschillen zien tussen rassen en effecten die te relateren zijn aan bijvoorbeeld temperatuur en waterbeschikbaarheid. Hierdoor wordt vaak volstaan met een gewas in te delen in de vier meest gebruikte categorieën: gevoelig, matig gevoelig, matig tolerant en tolerant. En misschien is dat ook wel terecht gezien de complexiteit van het begrip zouttolerantie.

6.5 KENNISHIATEN EN BENODIGD ONDERZOEK

Hieronder staan een aantal kennishiaten benoemd ten aanzien van de effecten van zoet-zout dynamiek op de landbouwgewassen.

Meer kennis nodig die van toepassing is op de Nederlandse context

Veel van de beschikbare kennis komt uit het buitenland. De getallen ter attentie van de zouttolerantie kunnen in dat geval niet zomaar worden overgenomen. Veel van de beschikbare data komt uit droge gebieden met hoge temperaturen. Naar alle waarschijnlijkheid zullen de tolerantie niveaus onder Nederlandse omstandigheden hoger kunnen uitpakken vanwege gemiddeld lagere temperaturen, lagere gewasverdamping en meer periodieke neerslag.

Zouttoleranties van doelgewassen verfijnen

De beschikbare gegevens laten een grote spreiding zien ter attentie van de niveaus van zouttolerantie. Voor het verfijnen van het handelingsperspectief is het noodzakelijk om de zouttolerantie van gewassen en specifieke rassen nauwkeuriger in kaart te brengen.

Vershil tussen droogteschade en zoutschade

Er zijn weinig tot geen kwantitatieve gegevens beschikbaar om het verschil tussen droogteschade en zoutschade goed in kaart te brengen. Dit is echter voor de praktijk wel zeer relevant. De vraag wat beter is (droogteschade voor lief nemen of incidenteel beregenen met (licht) brak water), wordt steeds relevanter. In Van Bakel en Stuyt (2011) stelt dat de grens voor het chloridegehalte in het irrigatiewater, waarbij de zoutschade hoger is dan de droogteschade, ligt bij concentraties die aanmerkelijk hoger zijn dan de zoutschadedrempelwaarde. Oftewel, in veel gevallen zal de droogteschade groter zijn dan de verwachte zoutschade.

Een belangrijke kanttekening hierbij is dat de zoutschade uit modellen veelal gebaseerd zijn op de osmotische stress wat mogelijk een structurele onderschatting geeft van de schade waarbij ook rekening wordt gehouden met de ionenstress (Van Bakel en Stuyt, 2011). Het verder uitwerken van de vraag of droogteschade of zoutschade 'beter' is, vereist echter meer kennis over het effect van zout op de bodem en het gewas.

En dit is weer afhankelijk van onder andere het type bodem (zand, zavel, klei, en dergelijke), de huidige staat van de bodem (vochtpercentage, bezetting klei-humus complex, percentage organische stof, en dergelijke.), het gewas zelf, het ras en het ontwikkelingsstadium. Deze details dienen nader onderzocht te worden.

Effecten van eigenschappen van zoutpuls beter in beeld brengen

In lijn met bovenstaande punt is het van belang om aan te geven dat er nauwelijks data beschikbaar is over het effect van een korte zoutpiek op bodem en gewas, en het mogelijke herstel van zowel het gewas als ook de bodem. Ook dit dient nader uitgewerkt te worden.

KennisCluster Verzilting (SALTA) is bezig om met een groot netwerk de kennishiaten in kaart te brengen. Deze kennisagenda is nog niet openbaar maar zal wel binnenkort verschijnen op de website van www.salta-cluster.com. Voor een volledig overzicht van de kennishiaten is het aan te raden deze kennisagenda aan te houden.

6.6 SAMENVATTING MET ZAKEN DIE RELEVANT ZIJN VOOR HET AFWEGINGSKADER

Om de effecten van zoet-zout dynamiek op de landbouw te duiden, zijn er op hoofdlijnen drie belangrijke parameters die van invloed zijn:

- het irrigatiewater (vorm van irrigeren en waterkwaliteit);
- de bodem (bodemtype, bodemtextuur, percentage organische stof, calcium en magnesium);
- de doelgewassen zelf (het ras, de manier van teelt en het ontwikkelingsstadium).

In deze kennisrapportage wordt alleen gekeken naar de top 11 gewassen die in Nederland worden verbouwd in de provincies die vandaag de dag al in meer of mindere mate te maken hebben met zoet-zout dynamiek. Deze doelgewassen hebben een wisselende tolerantie voor verzilting. Daardoor stelt elk doelgewas andere eisen aan de gewenste kwaliteit van het irrigatiewater en van de bodemtextuur. Doelgewassen die tolerant zijn, kunnen een hoger zoutgehalte aan of stellen lagere eisen aan de bodemtextuur dan doelgewassen die matig tolerant of gevoelig zijn. Ook is het ontwikkelingsstadium van een gewas bepalend hoe groot het effect van een bepaalde zoutconcentratie is, en voor de verschillende gewassen vallen deze stadia vaak in een specifiek deel van het jaar. Het effect van een korte zoutpiek op bodem en gewas is vaak onbekend, net zoals de mogelijke hersteltijd. Hiervoor zijn thans geen grenswaarden voor op te stellen, ook niet met een deskundigenoordeel. Dit zijn aanzienlijke beperkingen voor het afwegingskader. In praktische zin betekent dit voor het afwegingskader dat een korte zoutpiek nu behandeld wordt als een permanent hoger zoutgehalte voor het maken van een beoordeling. Op hersteltijd kan geen beoordeling worden gegeven.

AFWEGINGSKADER

Concreet voor het afwegingskader betekent dit dat bij de gebruiker gegevens moeten worden opgehaald over de doelgewassen, de vorm en waterkwaliteit van het irrigatiewater en de eigenschappen van de bodem. Met behulp van de kwalitatieve zouttolerantie van de doelgewassen tijdens de verschillende groeistadia (tabel 6.5) en het bodemtype (zand, lichte/zware zavel, klei) kan worden bepaald wat het maximaal gewenste zoutgehalte van het irrigatiewater is (tabel 6.1). Door dit te vergelijken met het zoutgehalte dat thans wordt gebruikt, kan worden ingeschat in hoeverre de doelgewassen een risico lopen op nadelige effecten ten gevolge van verzilting in de huidige situatie. Dezelfde inschatting van risico's wordt opgesteld voor een toekomstige situatie (bijvoorbeeld: een verstoring die leidt tot zouter irrigatiewater). Op basis hiervan kan de gebruiker inschatten of een verstoring leidt tot hogere risico's dan in de huidige situatie. Tegelijkertijd geeft deze analyse de gebruiker inzicht in welk bereik van zoutgehaltes kan worden gehanteerd om nadelige effecten voor de doelgewassen te voorkomen, nu en in de nabije toekomst.

Het is noodzakelijk om de risico's op de doelgewassen in de context te plaatsen van hoeveel er wordt geïrrigeerd. Een gewas kan bijvoorbeeld intrinsiek een hoog risico lopen tijdens de kiemfase of tijdens de hele levensfase, maar als er slechts weinig wordt geïrrigeerd, dan zal het uiteindelijke risico mogelijk mee kunnen vallen.

Om te bepalen hoeveel irrigatiewater teveel is en tot nadelige effecten kan leiden, wordt gekeken naar de hoeveelheid natrium die aan de bodem wordt toegevoegd door het irrigeren. In het kennisoverzicht is uitgelegd dat met name natrium en niet zozeer chloride sterk nadelig is voor de bodem en daarmee voor de doelgewassen. In onderstaande tabel staat aangegeven welke grenswaarden kunnen worden toegepast (op basis van een deskundigenoordeel) om risico's te bepalen ten aanzien van het watervolume waarmee wordt geïrrigeerd.

Als het irrigatievolume duidt op een laag risico, dan kunnen de risico's van de doelgewassen zelf naar beneden worden bijgesteld. Het is aan de gebruiker zelf om de risico's naar beneden bij te stellen bij het maken van de eindbeoordeling.

TABEL 6.7 GRENSSWAARDEN VOOR HET WATERVOLUME VAN IRRIGATIEWATER TER ATTENTIE VAN NADELIGE EFFECTEN VOOR DE OPBOUW VAN (TE VEEL) NATRIUM IN DE BODEM. DEZE GRENSSWAARDEN ZIJN OPGESTELD ALS EEN DESKUNDIGENOORDEEL DOOR THE SALT DOCTORS

Watervolume irrigatie (mm / jaar)	Risico op nadelige effecten ten gevolge van natrium in de bodem
< 80	laag
80 - 200	midden
> 200	hoog

Naast de doelgewassen zelf en het watervolume irrigatiewater is de bodem zelf de laatste belangrijke component voor het inschatten van risico's voor de landbouw. Een bodemtextuur met een laag kleipercentage, een goed bufferend klei-humuscomplex (alleen relevant voor kleiige bodems) en een hoog organisch stofgehalte draagt bij aan een laag risico op nadelige effecten door verzilting (paragraaf 3.4.2). Zodra een of meerdere componenten van de bodemtextuur hiervan afwijken, neemt het risico op nadelige effecten ten gevolge van verzilting toe. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de grenswaarden in tabel 6.8 en tabel 6.9.

TABEL 6.8 GRENSSWAARDEN VOOR DE BODEMTEXTUUR. DEZE GRENSSWAARDEN ZIJN OPGESTELD ALS EEN DESKUNDIGENOORDEEL

Kleipercentage	Klei-humuscomplex	Risico op nadelige effecten ten gevolge van verzilting
<10 %	niet relevant voor bepaling	laag
10 - 30 %	- $\text{Ca}^{2+} > 80\%$ + $\text{Mg}^{2+} < 10\%$ + $\text{Na}^+ < 1,5\%$ - Calcium, Magnesium en/of Natrium wijkt af van bovenstaand	laag midden
>30 %	- $\text{Ca}^{2+} > 80\%$ + $\text{Mg}^{2+} < 10\%$ + $\text{Na}^+ < 1,5\%$ - Calcium, Magnesium en/of Natrium wijkt af van bovenstaand	midden hoog

TABEL 6.9 GRENSSWAARDEN VOOR ORGANISCHE STOF IN DE BODEM. DEZE GRENSSWAARDEN ZIJN OPGESTELD ALS EEN DESKUNDIGENOORDEEL

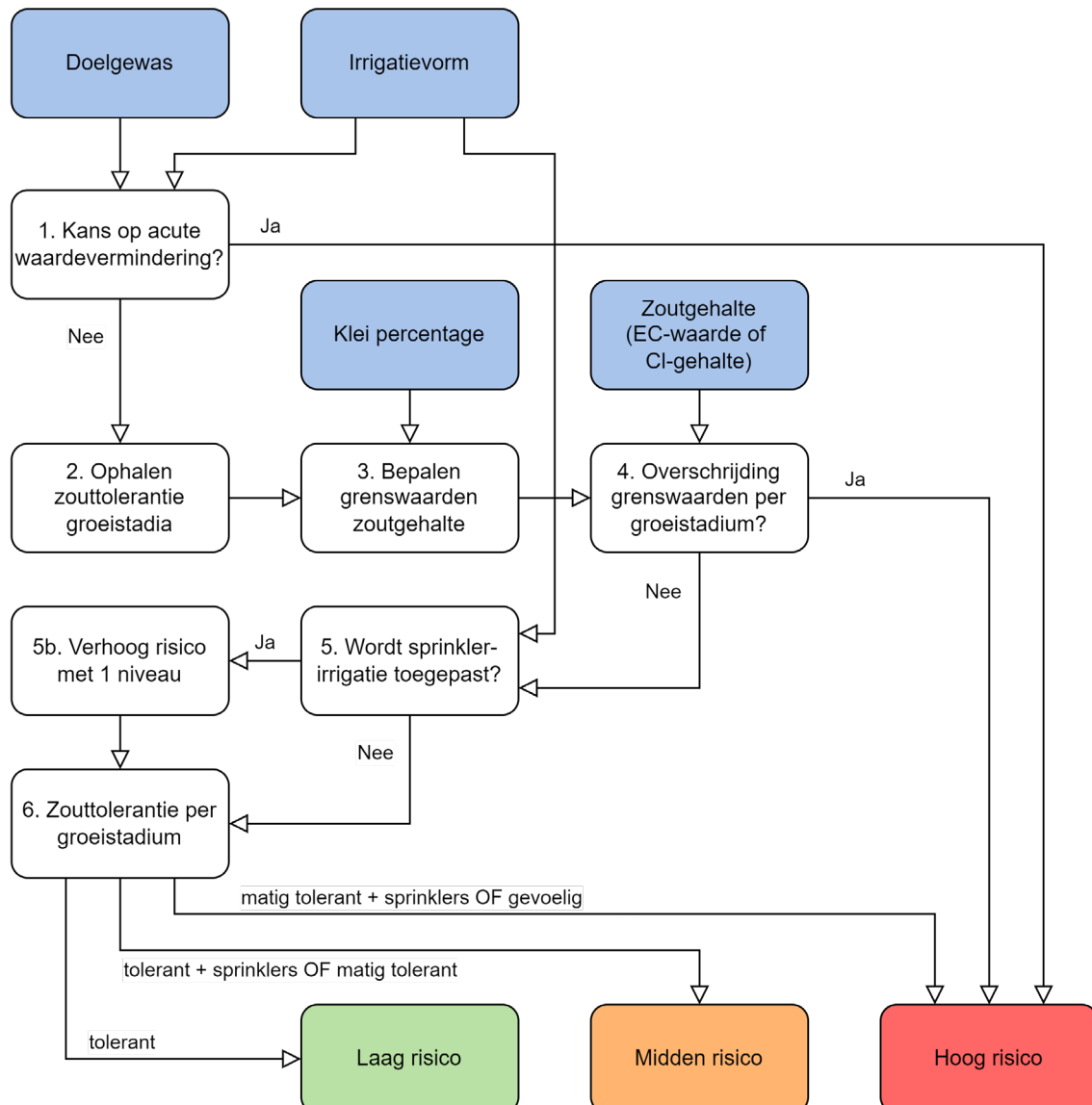
Organische stofpercentage	Risico op nadelige effecten ten gevolge van verzilting
<1,5 %	hoog
1,5 - 3,5 %	midden
>3,5 %	laag

Kortom, in het afwegingskader wordt gestuurd op de eigenschappen van de doelgewassen zelf, de hoeveelheid irrigatiewater (een mate voor de hoeveelheid natrium die aan de bodem wordt toegevoegd), het kleipercentage en de bufferende werking van de bodem. Dit is samengebracht in een stroomschema dat, gebruik makend van de tabellen uit dit hoofdstuk, uit komt bij een risicobepaling per doelgewas voor de huidige situatie en een toekomstige (zoutere of zoetere) situatie.

Dit stroomschema en bovenstaande onderbouwing suggereert misschien dat we al duidelijk weten hoe zoet-zout dynamiek doorwerkt op de landbouw, maar er zijn nog veel kennisleemten zoals toegelicht in hoofdstuk 6.5. Daarnaast maakt het stroomschema visueel duidelijk dat de bepaling van het risico op veel verschillende invoer berust. Dit tezamen maakt het moeilijk om één waarde als harde grenswaarde mee te geven, hoewel dat in bovenstaande tabellen wel is getracht met de huidige beschikbare kennis en een deskundigenoordeel van The Salt Doctors. Gegeven de kennisleemten is het daarom wenselijk om met een bandbreedte te werken. Naast het normaal doorlopen van het stroomschema, wordt aangeraden het stroomschema een tweede keer te doorlopen met een kleiigere bodemtextuur.

Bijvoorbeeld: de gebruiker van het afwegingskader heeft een matig tolerant gewas en een bodemtype lichte zavel geselecteerd. Dit leidt tot een grenswaarde van een EC van 7,0 dS/m (zie tabel 6.1). Voor de bandbreedte worden dan ook dezelfde stappen doorlopen met een zware zavel, wat leidt tot een EC van 5,5 dS/m. In combinatie met het opgegeven zoutgehalte wordt dan een risico voor beide gevallen bepaald (“normale” situatie en “conservatieve” situatie). Zo wordt beter recht gedaan aan de grote onzekerheid die er nu nog is over de grenswaarden.

AFBEELDING 6.2 STROOMSCHEMA VOOR BEOORDELING ZOUTGEHALTE HUIDIGE SITUATIE EN ZOUTGEHALTE TOEKOMSTIGE SITUATIE. DE BLAUWE BLOKKEN ZIJN BENODIGDE INVOERPARAMETERS. DE WITTE BLOKKEN ZIJN HET STAPPENPLAN EN DE STOPLICHTBLOKKEN ONDERAAN ZIJN DE RESULTERENDE RISICO-BEPALINGEN. DE GEBRUIKER DOORLOOPT DE STAPPEN 1 TOT EN MET 6. DE INKOMENDE PIJLEN GEVEN AAN WELKE INVOER NODIG IS VOOR ELKE VRAAG. DE UITKOMST VAN DE WITTE BLOKKEN BEPAALT HOE DE GEBRUIKER DOOR HET STROOMSCHEMA LOOPT EN WELK RISICO PAST BIJ DE SITUATIE VAN DE GEBRUIKER. DIT STROOMSCHEMA WORDT PER GESELECTEERD DOELGEWASTYPE DOORLOPEN



7

CONCLUSIE

De problematiek omtrent de zoet-zout dynamiek in Nederland is een groeiende zorg, vooral gezien de toenemende frequentie en intensiteit van droge en hete zomers door klimaatverandering. Deze veranderingen hebben geleid tot een verhoogde invloed van zout(er) water in diverse watersystemen, vooral in Laag-Nederland. Dit fenomeen heeft aanzienlijke gevolgen voor de beschikbaarheid van zoetwaterbronnen en daarmee voor de landbouw, natuurlijke ecosystemen en het behalen van de doelen onder andere de KRW, N2000 en NNN.

In deze kennisrapportage stonden de volgende twee kernvragen centraal:

- wat is het effect van verzilting of verzoeting op de natuur en landbouw?
- wat is de hersteltijd na deze (tijdelijke) verzilting of verzoeting?

EFFECT VAN VERZILTING OF VERZOETING OP NATUUR EN LANDBOUW

De eerste vraag betreft de effecten van verzilting en verzoeting op de verschillende functies binnen de Nederlandse context, zijnde de aquatische natuur, terrestrische natuur en landbouw. Onze bevindingen tonen aan dat deze processen diverse negatieve effecten kunnen hebben. De hydrologische, biogeochemische en biologische processen die optreden bij verzilting of verzoeting (hoofdstuk 3) beïnvloeden de waterkwaliteit en de ecologische gezondheid van zowel aquatische (hoofdstuk 4) als terrestrische systemen (hoofdstuk 5). Voor landbouwsystemen kunnen verhoogde zoutconcentraties leiden tot verminderde gewasopbrengsten en verstoorde bodemstructuren (hoofdstuk 6). De rapportage biedt een overzicht van de huidige kennis over deze effecten en de grenswaarden waarbij nadelige gevolgen optreden, wat waardevolle inzichten biedt voor waterbeheerders.

Uit dit overzicht van de huidige kennis blijkt echter dat er nog veel kennislacunes zijn. Vanuit de functies natuur komt bijvoorbeeld naar voren dat er nog onvoldoende kennis is om de effecten van zout te scheiden van eutrofiëring en sulfaat- en ammoniumtoxiciteit. Daarnaast is het belang van de ontstaansgeschiedenis aangekaart om de effecten van zout te bepalen, maar is het nog onduidelijk hoe de ontstaansgeschiedenis bijvoorbeeld de mate van verzilting van de wortelzone beïnvloedt en hoe snel zout na (tijdelijke) verzilting weer uitspoelt. De afwezigheid van zowel een standaard normering van zoutgehalte als systematische meetgegevens over milieuranges van soorten maakt het vooralsnog moeilijk om de verwachte effecten op de individuele soorten en soortgemeenschappen goed te kunnen onderbouwen. Hierdoor weten we nu niet goed onder welke omstandigheden (onomkeerbare) schade optreedt ten gevolge van zoutcondities.

HERSTELTIJD

De tweede vraag richt zich op de hersteltijd na tijdelijke verzilting of verzoeting. Hieruit blijkt dat, ondanks de kennis over de onmiddellijke effecten, er een aanzienlijk gebrek aan informatie bestaat over hoe snel en op welke manier ecosystemen en landbouwgronden zich herstellen na blootstelling aan verhoogde zoutgehalten. Dit aspect is cruciaal voor het ontwikkelen van effectieve strategieën voor zowel proactief als reactief beheer. Zonder gedetailleerd inzicht in de hersteltijd en de dynamiek van herstel, blijven de mogelijkheden voor effectief waterbeheer beperkt.

Voor de aquatische en terrestrische natuur, evenals voor de landbouw, bestaan er specifieke kennishiaten die variëren afhankelijk van de unieke kenmerken van deze systemen. Het is duidelijk dat verder onderzoek noodzakelijk is om deze lacunes te vullen.

Dit benodigde onderzoek dient niet alleen de directe effecten van verzilting en verzoeting in kaart te brengen, maar ook de bredere ecologische (en economische) gevolgen op de lange termijn te onderzoeken.

RICHTING AFWEGINGSKADER

De ontwikkeling van een praktisch afwegingskader, in de vorm van een beslisboom, is een belangrijke stap vooruit. Deze beslisboom biedt waterbeheerders een gestructureerde benadering voor het omgaan met de zoet-zout dynamiek, vooral tijdens periodes van droogte en lage rivierwaterafvoeren. Deze beslisboom wordt gebaseerd op de huidige beschikbare kennis en deskundigenoordeel zoals uiteengezet in deze kennisrapportage.

Om deze beslisboom echter effectief te maken, is het van cruciaal belang dat deze is onderbouwd door robuuste, op feiten gebaseerde kennis. Hiervoor worden de grenswaarden gebruikt die zijn gepresenteerd en toegelicht in deze kennisrapportage. Het is echter belangrijk hierbij op te merken dat er nog veel kennishiaten zijn waar geen grenswaarden voor bekend zijn. Er is daarom een voortdurende investering nodig in onderzoek en samenwerking tussen wetenschappers, beleidsmakers en waterbeheerders om invulling te geven aan deze kennishiaten. Eerste onderzoeksrichtingen op basis van huidig inzicht zijn gegeven in paragraaf 4.7 (aquatische natuur), paragraaf 5.4 (terrestrische natuur) en paragraaf 6.5 (landbouw).

Voor het onderwerp 'hersteltijd' is thans nagenoeg geen kennis beschikbaar in de grijze en wetenschappelijke literatuur, laat staan voor de Nederlandse context. Hiervoor is uitgebreid wetenschappelijk onderzoek nodig waarin het effect van de verschillende eigenschappen van een zoutpuls op het herstelvermogen van soorten wordt onderzocht. Dit ontbreekt nu. De kennis is dermate gebrekkig dat ook het vormen van een deskundigenoordeel naar praktische grenswaarden niet mogelijk is. Daarom wordt in de huidige vorm van het afwegingskader geen uitspraak gedaan over hoe lang de hersteltijd is na een zoet- of zoutpuls. De eigenschappen van een zoet- of zoutpuls worden wel opgevraagd, zodat de gebruiker dit mee kan nemen in het maken van de eindbeoordeling.

Dit betekent dat de beslisboom een werkdocument is dat voortdurend in ontwikkeling zal blijven bij voortschrijdend inzicht. De beslisboom biedt gebruikers de mogelijkheid om effecten en risico's af te wegen, en wordt dusdanig opgezet dat nieuwe kennis gemakkelijk en overzichtelijk kan worden ingebouwd en meegenomen in de redeneerlijn. Kennislacunes worden zoveel mogelijk ondervangen en onder de aandacht gebracht bij de gebruiker bij het invullen en uitlezen van de resultaten.

Waterbeheerders kunnen de beslisboom gebruiken om afwegingen te maken, zoals het al dan niet inlaten van zout water tijdens droogte en een dalend waterpeil, door de risico's van verzilting te vergelijken met die van droogte (onder andere STOWA toetskader inlaten gebiedsvreemd water). Deze aanpak stelt waterbeheerders in staat om weloverwogen keuzes te maken en te streven naar een balans tussen ecologische gezondheid, landbouw en waterhuishouding, terwijl de beslisboom blijft evolueren op basis van nieuwe inzichten en gegevens.

8

REFERENTIES

- 1 Acacia Water (2011). Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland, eindrapport. Kennisprogramma Klimaat voor Ruimte.
- 2 Acacia Water, Leven met Water & STOWA (2009). Overzicht huidige kennis omtrent interne verzilting.
- 3 Altenburg, W., Arts, G., Baretta-Bekker, J. G., van den Berg, M. S., van den Broek Broek, T., Buskens, R., ... & Walvoort, D. (2018). Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water 2021-2027 (No. 2018-49). Stowa.
- 3 Ardon, M., Morse, J.L., Colman, B.P., & Bernhardt, E.S. (2013). Drought-induced saltwater incursion leads to increased wetland nitrogen export. *Global Change Biology*, 19, 2976-2985.
- 4 Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- 5 Bagarinao, T. (1992). Sulfide as an environmental factor and toxicant: tolerance and adaptations in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology*, 24(1-2), pp.21-62.
- 6 Bakel PJT, Blom-Zandstra M, Stuyt LCPM. 2018. Zouttolerantie van gewassen afhankelijk van het groeistadium? Resultaten van een literatuuronderzoek. Wageningen, Wageningen Environmental Research, rapport 2897. 44 blz.; 16 fig.;46 ref.
- 7 Bal, D., Beijer, H.M., Fellingner, M., Haveman, R., van Opstal, A.J.F.M., & van Zadelhoff, F.J. (2001). *Handboek natuurdoeltypen; 2e geheel herz. ed. (Rapport / Expertisecentrum LNV; No. 2001/020)*. Ministerie van LNV.
- 8 Barendregt, A. (1993). *Hydro-ecology in the Dutch polder landscape*. Dissertatie Rijksuniversiteit Utrecht, Utrecht.
- 9 Barendregt, A., & Bootsma, M.C. (1991). *Het hydro-ecologisch model ICHORS (versies 3.1 en 3.2). De relaties tussen wateren moerasplanten en milieufactoren in de provincie Utrecht*. Interfacultaire Vakgroep Milieukunde Rijksuniversiteit Utrecht, Utrecht.
- 10 Barendregt, A., & Van Leerdam, A. (1990). *Het hydro-ecologisch voorspellingsmodel ICHORS (versie 3.3) voor de provincie Zuid-Holland / - Utrecht* Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht. ISBN 90-6266-126-2.
- 11 Barendregt, A., Nieuwenhuis, J.W., & de Joode, P. (1990). *Milieu-indicatiewaarden van water- en oeverplanten in Noord-Holland*. Provincie Noord-Holland, Dienst Milieu en Water/ Interfacultaire Vakgroep Milieukunde van de Rijksuniversiteit Utrecht, Haarlem/Utrecht.
- 12 Barendregt, A., Wassen, M.J., de Smidt, J.T., & Lippe, E. (1986). Ingreep-effectvoorspelling voor waterbeheer. *Landschap*, 3, 41-55.

- 13 Beijersbergen, J. & P. van der Reest, 2004. Plan Tureluur halverwege: Herstel brakwatermoeras langs
- 14 de Oosterschelde. *De Levende Natuur* 105(5): 195-199.
- 15 Bharbwaj, A.K., Rajwar, D., & Nagaraja, M.S. (2020). Soil fertility problems and management. In: *Managing salt-affected soils for sustainable agriculture*, 386-407.
- 16 Boon, P.I., Moriarty, D.J.W. & Saffigna, P.G. (1986). Nitrate metabolism in sediments from seagrass (*Zostera capricorni*) beds of Moreton Bay, Australia. *Marine Biology*, 91, pp.268-276.
- 17 Bootsma, M.C., Van Den Broek, T., Barendregt, A., & Beltman, B. (2002). Rehabilitation of acidified floating fens by addition of buffered surface water. *Restoration Ecology*, 10, 112-121.
- 18 Boustany, R., Michot, T., & Moss, R. (2010). Effects of salinity and light on biomass and growth of *Vallisneria americana* from Lower St. Johns River, FL, USA. *Wetlands Ecology and Management*, 18 (2), 203 – 217. doi:10.1007/s11273-009-9160-8. S2CID 24446372.
- 19 Broekmeyer, M.E.A., Schouwenberg, E.P.A.G., Van der Veen, M., Prins, D., & Vos, C. (2006). Effectenindicator Natura 2000-gebieden; achtergronden en verantwoording ecologische randvoorwaarden en storende factoren. Alterra-rapport 1375. Alterra, Wageningen.
- 20 Brouns, K., Verhoeven, J.T.A., & Hefting, M.M. (2014). The effects of salinization on aerobic and anaerobic decomposition and mineralization in peat meadows: The roles of peat type and land use. *Journal of Environmental Management*, 143, 44-53.
- 21 Burgin, A.J. & Hamilton, S.K. (2007). Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? A review of nitrate removal pathways. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, pp.89-96.
- 22 Burgin, A.J. & Hamilton, S.K. (2008). NO₃--driven SO₄²⁻ production in freshwater ecosystems: implications for N and S cycling. *Ecosystems*, 11, pp.908-922.
- 23 Burgin, A.J., Yang, W.H., Hamilton, S.K., & Silver, W.L. (2011). Beyond carbon and nitrogen: how the microbial energy economy couples elemental cycles in diverse ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, 44-52.
- 24 Corillion, R. (1957). Les Charophycées de France et d'Europe occidentale. *Bulletin de la Societe scientifique de Bretagne*, 32, 1-499.
- 25 Counette, G. (2022). Drinkwater voor dieren, van start tot staart. www.cvier.nl.
- 26 Craft, C., Clough, J., Ehman, J., Joye, S., Park, R., Pennings, S., Guo, H., & Machmuller, M. (2009). Forecasting the effects of accelerated sea level rise on tidal marsh ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(2), 73-78.
- 27 Cusell, C., van Ek, R., Mandemakers, J., & Klinge, M. (2018). Markiezaatsmeer. Nader onderzoek natuur en waterkwaliteit, W+B rapport 102512/18-006.519, Deventer.
- 28 Day, J.W., Christian, R.R., Boesch, D.M., Yáñez-Arancibia, A., Morris, J., Twilley, R.R., Naylor, L., & Schaffner, L. (2008). Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands. *Estuaries and coasts*, 31(3), 477-491.
- 29 De Lyon, M.J.H., & Roelofs, J.G.M. (1986). Waterplanten in relatie tot waterkwaliteit en bodemgesteldheid. Delen I en 2. Laboratorium voor Aquatische Oecologie, Katholieke Universiteit Nijmegen, Nijmegen.

- 30 De Vos, A.C., Bruning, B., van Straten, G., Oosterbaan, R., Rozema, J., & van Bodegom, P. (2016). Crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on field trials conducted by Salt Farm Texel. Report 39 pages.
- 31 De Vries, H. & B. Vrijhof (1958). De landbouwwaterhuishouding in de provincie Noord Holland. Commissie onderzoek landbouwwaterhuishouding Nederland, T.N.O, 1958. 159 pags. + kaarten.
- 32 Delsman, J.R., Essink, G.H.O., Beven, K.J., & Stuyfzand, P.J. (2013). Uncertainty estimation of end member mixing using generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE), applied in a lowland catchment. *Water Resources Research*, 49(8), 4792-4806.
- 33 Delsman, J.R., Hu-a-ng, K.R.M., Vos, P.C., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Stuyfzand, P.J., & Bierkens, M.F.P. (2014). Paleo-modeling of coastal saltwater intrusion during the Holocene: an application to the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3891 – 3905.
- 34 Delsman, J.R., Van Baaren, E.S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karaoulis, M.C., Pauw, P., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P.G.B., Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Steuer, A., Meyer, U., Revil, A., & Oude Essink, G.H.P. (2018). Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. *Environ. Res. Lett.*, 13, 084011.
- 35 Delsman, J. R., Mulder, T., Verastegui, B. R., Bootsma, H., Zitman, P., Huizer, S., & Essink, G. H. O. (2023). Reproducible construction of a high-resolution national variable-density groundwater salinity model for the Netherlands. *Environmental Modelling & Software*, 164, 105683.
- 36 Deltacommissaris (2013). Deltaprogramma 2014: Werk aan de delta.
- 37 Deltaplan Zoetwater 2022 - 2027 (2021). I&W. <https://www.deltaprogramma.nl/themas/documenten/publicaties/2021/09/21/dp2022-d-deltaplan-zoetwater-2022-2027>
- 38 Deltaprogramma; Deelprogramma Zuidwestelijke Delta (2011). Lange termijn verkenning Zuidwestelijke delta.
- 39 Dobben, H.F., Janssen, J.A.M., & Schmidt, A.M. (2008). Structuur en Functie van Habitattypen: Nadere definiëring en monitoring in het kader van de Habitatrictlijn. Deel II: kritische condities en wijze van monitoring. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1561.
- 40 Doering, P., Chamberlain, R., Donohue, K., & Steinman, A. (1999). Effect of salinity on the growth of *Vallisneria americana* Michx. From the Caloosahatchee estuary, Florida. *Quarterly Journal of the Florida Academy of Science*, 62(2), 89 – 105.
- 41 Eindrapport Joint fact-finding robuustheid IJsselmeergebied bij droogte (2021). [file:///C:/Users/tine.tewinkel/Downloads/3.1.4+Eindrapport+Joint+fact-finding+robuustheid+IJsselmeergebied+bij+droogte+\(inclusief+bijlagen\).pdf](file:///C:/Users/tine.tewinkel/Downloads/3.1.4+Eindrapport+Joint+fact-finding+robuustheid+IJsselmeergebied+bij+droogte+(inclusief+bijlagen).pdf)
- 42 Emmerik, W. A. M. (2016). Biologische factsheets trekvissen Haringvliet en Voordelta. Sportvisserij Nederland.
- 43 Evers, C. H. E., Van den Broek, A. J. M., Buskens, R., Van Leerdam, A., Knobens, R. A. E., Van Herpen, F. C. J., & Pot, R. (2018). Omschrijving MEP en maatlatten voor sloten en kanalen voor de Kaderrichtlijn Water 2021-2027 (Vol. 169). STOWA.

- 44 FAO & ICBA (2023). Thematic 1: Farmers' guidelines on soil and water management in salt-affected areas. Rome, FAO. doi.org/10.4060/cc4200en
- 45 Friocourt, Y.F. (2020). Nieuwe inzichten naar aanleiding van de verzilting van het IJsselmeer in 2018 en actualisatie van de posten van de water- en zoutbalans van het meer. RWS informatie rapport.
- 46 Friocourt, Y.F., Uittenbogaard, R.E., Cornelisse, J.M., & Balkema, S. (2013). Luchtbellenpluimen in de Nieuwe Waterweg. Eindrapportage schaalonderzoek. Deltares rapport 1206501-000-ZKS-0021. [Air bubble plumes in the Nieuwe Waterweg. Final report on scale research. Deltares report 1206501-000-ZKS0021]
- 47 Galvan-Ampudia, C.S., Julkowska, M.M., Darwish, E., Gandullo, J., Korver, R.A., Brunoud, G., Haring, M.A., Munnik, T., Vernoux, T., & Testerink, C. (2013). Halotropism is a response of plant roots to avoid a saline environment. *Current Biology*, 23, 2044-2050. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2013.08.042>
- 48 Geurts, J.J., Smolders, A.J., Verhoeven, J.T., Roelofs, J.G., & Lamers, L.P. (2008). Sediment Fe: PO4 ratio as a diagnostic and prognostic tool for the restoration of macrophyte biodiversity in fen waters. *Freshwater Biology*, 53(10), 2101-2116.
- 49 Griffioen, A. B. & Winter, H. V. (2014). Het voorkomen van diadrome vis in de spuikom van Kornwerderzand 2001 - 2012 en de relatie met spuidebieten. IMARES, Ijmuiden, C036/14.
- 50 Heekey, R., & Kilham, P. (1988). Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology and Oceanography*, ii, (pan 2), 796-S22.
- 51 Herbert, E.R., Boon, P., Burgin, A.J., Neubauer, S.C., Franklin, R.B., Ardón, M., Hopfensperger, K.N., Lamers, L.P., & Gell, P. (2015). A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, 6, 1-43.
- 52 Hoag, R.S., & Price, J.S. (1997). The effects of matrix diffusion on solute transport and retardation in undisturbed peat in laboratory columns. *Journal of Contaminant Hydrology*, 28, 193-205.
- 53 Hootsmans, M.J.M. (1996). Planten in de Peiling - The effect of chronic and temporary saltstress on growth and development of four species of helophytes-. RIZA notanr. 96.039, Lelystad.
- 54 Hootsmans, M.J.M., & Wiegman, F. (1998). Four helophyte species growing under salt stress: their salt of life? *Aquatic Botany*, 62, 81-94.
- 55 Houle, G., Morel, L., Reynolds, C.E., & Siégel, J. (2001). The effect of salinity on different developmental stages of an endemic annual plant, *Aster laurentianus* (Asteraceae). *American Journal of Botany*, 88(1), 62 – 67. doi:10.2307/2657127
- 56 Irik, H.A., & Bikmaz, G. (2024). Effect of different salinity on seed germination, growth parameters and biochemical contents of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds cultivars. *Sci Rep*, 14, 6929. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55325-w>
- 57 Jansen, M. (1998). Productie, transport en depositie van zoutspray in de kustzone. WL Delft Hydraulics Z2329, studie in het kader van Maasvlakte 2.

- 58 Jeppesen, E., Søndergaard, M., Kanstrup, E., Petersen, B., Eriksen, R.B., Hammershøj, M., & Have, A. (1994). Does the impact of nutrients on the biological structure and function of brackish and freshwater lakes differ? *Hydrobiologia*, 275-276(1), 15-30.
- 59 Jeppesen, E., Søndergaard, M., Pedersen, A.R., et al. (2007). Salinity Induced Regime Shift in Shallow Brackish Lagoons. *Ecosystems*, 10, 48-58. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-9007-6>.
- 60 Jun, M., Altor, A.E., Craft, C.B. (2013). Effects of increased salinity and inundation on inorganic nitrogen exchange and phosphorus sorption by tidal freshwater floodplain forest soils, Georgia (USA). *Estuaries and Coasts*, 36, 508-518.
- 61 Kerkum, E.C., Pannenbakker, C., Coops, H. (1996). Planten in de Peiling - Kieming van oeverplanten in relatie tot het zoutgehalte in het substraat -. RIZA werkdocumentnr. 96.011x, Lelystad.
- 62 Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., van den Hurk, B., Lenderink, G. (2015). KNMI'14- klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie.
- 63 Koch, M.S. & Mendelssohn, I.A. (1989). Sulphide as a soil phytotoxin: differential responses in two marsh species. *The Journal of Ecology*, pp.565-578.
- 64 Kostka, J.E., Gribsholt, B., Petrie, E., Dalton, D., Skelton, H., Kristensen, E. (2002). The rates and pathways of carbon oxidation in bioturbated salt-marsh sediments. *Limnology and Oceanography*, 47, 230-240.
- 65 Kronzucker, H.J., Coskun, D., Schulze, L.M., Wong, J.R. & Britto, D.T. (2013). Sodium as nutrient and toxicant. *Plant and soil*, 369, pp.1-23.
- 66 Lamers, L.P.M., Govers, L.L., Janssen, I.C.J.M., Geurts, J.J.M., Van der Welle, M.E.W., Van Katwijk, M.M., Van der Heide, T., Roelofs, J.G.M., Smolders, A.J.P. (2013). Sulfide as a soil phytotoxin—a review. *Front. Plant Sci.*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00268>.
- 67 Lauer, N., Yeager, M., Kahn, A.E., Dobberfuhl, D.R., Ross, C. (2011). The effects of short term salinity exposure on the sublethal stress response of *Vallisneria spiralis* Michx. (Hydrocharitaceae), *Aquatic Botany*, 95 (3), 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.06.002>.
- 68 Maas, E.V., Hoffman, G.J. (1977). Crop salt tolerance, current assessment. *ASCE J. Irrig. Drain. Div.*, 103, 115-134.
- 69 Matsuda, K., Riazi, A. (1981). Stress-induced osmotic adjustment in growing regions of barley leaves. *Plant Physiol.*, 68(3), 571-6. doi: 10.1104/pp.68.3.571.
- 70 Minhas, P.S., Qadir, M. (2024). Agroclimate-centric irrigation water quality guidelines. *Irrigation and Drainage*, 1-14. DOI: 10.1002/ird.2946.
- 71 Moreira, M.H., They, N.H., Rodrigues, L.R., Alvarenga-Lucius, L., Pita-Barbosa, A. (2023). Salty freshwater macrophytes: The effects of salinization in freshwaters upon non-halophyte aquatic plants. *Science of The Total Environment*, 857, p.159608.
- 72 Munns, R. & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, pp.651-681.
- 73 Munns, R., Greenway, H., Delane, R., Gibbs, J. (1982). Ion Concentration and Carbohydrate Status of the Elongating Leaf Tissue *Hordeum vulgare* Growing at High External NaCl. *Journal of Experimental Botany*, 33 (4), 574—583. <https://doi.org/10.1093/jxb/33.4.574>.

- 74 Munns, R., Termaat, A. (1986). Whole-Plant Responses to Salinity. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13(1), 143. doi:10.1071/pp9860143.
- 75 Munns, R., Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol.*, 59, 651-81. doi: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911.
- 76 Myrbo, A., Swain, E.B., Engstrom, D.R., Coleman Wasik, J., Brenner, J., Dykhuizen Shore, M., Peters, E.B. & Blaha, G. (2017). Sulfide generated by sulfate reduction is a primary controller of the occurrence of wild rice (*Zizania palustris*) in shallow aquatic ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(11), pp.2736-2753.
- 77 Nissim, A.G. (1997). Influence of Periodic Fluctuations in Root Environment on Adaptation to Salinity in *Sorghum bicolor*. *Functional Plant Biology*, 24, 579-586. <https://doi.org/10.1071/PP96018>.
- 78 Noe, G., Krauss, K., Lockaby, B.G., Conner, W., Hupp, C. (2013). The effect of increasing salinity and forest mortality on soil nitrogen and phosphorus mineralization in tidal freshwater forested wetlands. *Biogeochemistry*, 114, 225-244.
- 79 Oude Essink, G., Pauw, P., Van Baaren, E., Zuurbier, K., De Louw, P., Veraart, J., McAteer, E., Van Der Schoot, M., Groot, N., Cappon, H., Waterloo, M., Hu-a-ng, K., Groen, M. (2018). Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening, GO-FRESH.
- 80 Oude Essink, G.H.P., Pauw, P.S. (2018). Evaluatie en verdiepend onderzoek naar grondwateronttrekkingsregels in de provincie Zeeland. *Deltares Rapp.*, 1231011-001, 157.
- 81 Oude Essink, G.H.P., Van Baaren, E.S., De Louw, P.G.B. (2010). Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resources Research*, 46(10), 1 – 16.
- 82 Oude Essink, G.H.P., Van Baaren, E.S., Van Vliet, M. (2008). Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, Deltares rapport 2008-U-R0322/A. Utrecht.
- 83 Parveen, M., Asaeda, T. & Rashid, M.H. (2017a). Hydrogen sulfide induced growth, photosynthesis and biochemical responses in three submerged macrophytes. *Flora*, 230, pp.1-11.
- 84 Parveen, M., Asaeda, T. & Rashid, M.H. (2017b). Biochemical adaptations of four submerged macrophytes under combined exposure to hypoxia and hydrogen sulphide. *PLoS One*, 12(8), p.e0182691.
- 85 Paulissen, M.P.C.P., Schouwenberg, E.P.A.G., Wamelink, G.W.W. (2007). Zouttolerantie van zoetwatergevoede natuurdoeltypen; verkenning en kennislacunes. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1545.
- 86 Peake, S. J. (2008). Swimming performance and behaviour of fish species endemic to Newfoundland and Labrador: A literature review for the purpose of establishing design and water velocity criteria for fishways and culverts. *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 2843*.
- 87 Pelgrum, A. (1963). Gevoeligheid voor verslemping van lichte klei- en zavelgronden. *Landbouwwoorlichting*, 20(11/12), 637-645. 's Gravenhage.
- 88 Pijlman, J., Sleiderink, J., Deru, J., Van Agtmaal, M. (2021). Literatuurstudie naar de toepassing van zilt slib en zouttoevoeging op veen, Publicatienummer 2021-016 LbD, Louis Bolk Instituut.

- 89 Pollman, C.D., Swain, E.B., Bael, D., Myrbo, A., Monson, P. & Shore, M.D. (2017). The evolution of sulfide in shallow aquatic ecosystem sediments: An analysis of the roles of sulfate, organic carbon, and iron and feedback constraints using structural equation modeling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(11), pp.2719-2735.
- 90 Rabalais, N.N. (2002). Nitrogen in aquatic ecosystems. *Ambio*, 31(2), 102-112.
- 91 Rawson, H.M., Munns, R. (1984). Leaf expansion in sunflower as influenced by salinity and short-term changes in carbon fixation. *Plant, Cell & Environment*, 7(3), 207-213.
- 92 Reddy, K.R., DeLaune, R.D. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: science and applications*. CRC press.
- 93 Regionaal Bestuurlijk Overleg Schelde (2004). *Karakterisering stroomgebied Schelde*.
- 94 Reigersman, C.J.A. (1946). *Ontziltling van Noord- Holland : rapport van de commissie inzake het zoutgehalte der boezem - en polderwateren van Noord Holland ingesteld bij besluit van den Minister van Waterstaat van 24 april 1939*. Rijksuitgeverij 's-Gravenhage, 191 pags. + 3 bijl.
- 95 Remane, A. (1934). Die Brackwasserfauna. *Verhandlungen Der Deutschen Zoologischen Gesellschaft*, 36, 34-37. zie Remane and Schlieper, 1958. *Die Biologie des Brackwassers*. 348 Seiten, 139 Abbildungen, 43 Tabellen, 920 g, Die Binnengewässer, Band 22. ArtNo. ES128002200, gebunden.
- 96 Rengasamy P, Marchuk. 2011. Cation ratio of soil structural stability (CROSS). *Soil Research* 49, 280-285.
- 97 Rijkswaterstaat (2024). [https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/beheer-en-ontwikkeling-rijkswateren/waddenzee/natuurlijke-processen-waddenzee#:~:text=De%20Waddenzee%20is%20een%20dynamische,%20en%20uit%20\(eb\)](https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/beheer-en-ontwikkeling-rijkswateren/waddenzee/natuurlijke-processen-waddenzee#:~:text=De%20Waddenzee%20is%20een%20dynamische,%20en%20uit%20(eb).).
- 98 Roden, E.E., Wetzel, R.G. (1996). Organic carbon oxidation and suppression of methane production by microbial Fe (III) oxide reduction in vegetated and unvegetated freshwater wetland sediments. *Limnology and Oceanography*, 41, 1733-1748.
- 99 Röling, Y.J.B. (1994). *Markiezaat 10 jaar afgesloten*. Flevovericht, 351, Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, Lelystad.
- 100 Runhaar, H. (2006). *Natuur in de verdringingsreeks*. Alterra rapport, 1302, Wageningen.
- 101 Runhaar, H., Hennekens, S. (2014). 'Hydrologische Randvoorwaarden Natuur' Versie 3, Gebruikershandleiding, Januari 2014. Zie <https://www.synbiosys.alterra.nl/waternood/>.
- 102 Runhaar, J., Arts, G., Knol, W., Makaske, B., Van den Brink, N. (2004). *Waterberging en natuur. Kennisoverzicht ten behoeve van regionale waterbeheerders*. Rapport 2004-16. STOWA, Utrecht.
- 103 Runhaar, J., Van der Linden, M., Witte, J.P.M. (1997). *Waterplanten en saliniteit*. RIZA rapport 96.063. RIZA, Lelystad.
- 104 Runhaar, J., Van Landuyt, W., Groen, C.L.G., Weeda, E.J., Verloove, F. (2004). *Herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen*. *Gorteria*, 30, 12-26. <https://www.synbiosys.alterra.nl/ecotopen/>.
- 105 Sakai, S., Nakaya, M., Sampei, Y., Dettman, D.L. & Takayasu, K. (2013). Hydrogen sulfide and organic carbon at the sediment-water interface in coastal brackish Lake Nakaumi, SW Japan. *Environmental earth sciences*, 68(7), pp.1999-2006.

- 106 Schultz, E. (1992). Water management of the drained lakes in the Netherlands, Academisch Proefschrift, 507pp., TUDelft.
- 107 Seitzinger, S.P., Gardner, W.S., Spratt, A.K. (1991). The effect of salinity on ammonium sorption in aquatic sediments: implications for benthic nutrient recycling. *Estuaries*, 14(2), 167-174.
- 108 Senavirathna, M.D.H.J., Wijesinghe, N.A., Liu, Z., Fujino, T. (2020). Effects of short-term exposure to different salinity levels on *Myriophyllum spicatum* and *Ceratophyllum demersum* and suitability of biomarkers to evaluate macrophyte responses to salinity stress. *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.*, 56, 23. <https://doi.org/10.1051/limn/2020021>.
- 109 Shavrukov, Y. (2013). Salt stress or salt shock: which genes are we studying? *J Exp Bot.*, 64(1), 119-27. doi: 10.1093/jxb/ers316.
- 110 Shoukat, E., Ahmed, M.Z., Abideen, Z., Azeem, M., Ibrahim, M., Gul, B., Khan, M.A. (2020). Short and long term salinity induced differences in growth and tissue specific ion regulation of *Phragmites karka*. *Flora*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151550>.
- 111 Skorupa, M., Gołębiewski, M., Kurnik, K., et al. (2019). Salt stress vs. salt shock - the case of sugar beet and its halophytic ancestor. *BMC Plant Biol.*, 19, 57. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1661-x>.
- 112 Smolders, A., Lamers, L., Lucassen, E., Van der Velde, G., Roelofs, J. (2006). Internal eutrophication: How it works and what to do about it—a review. *Chemistry and Ecology*, 22, 93-111.
- 113 Soued, C., Bogard, M.J., Finlay, K., Bortolotti, L.E., Leavitt, P.R., Badiou, P., Knox, S.H., Jensen, S., Mueller, P., Lee, S.C. and Ng, D., 2024. Salinity causes widespread restriction of methane emissions from small inland waters. *Nature Communications*, 15(1), p.717.
- 114 Stofberg, S.F. (2017). Hydrological controls on salinity exposure and the effects on plants in lowland polders. [internal PhD, WU, Wageningen University]. Wageningen University. <https://doi.org/10.18174/413397>.
- 115 Stuyfzand, P.J. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. PhD-Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam.
- 116 Stuyt, L.C.P.M., Blom-Zandstra, M., Kselik, R.A.L. (2016). Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen van bestaande gegevens. Wageningen, rapport 2739.
- 117 Stuyt, L.C.P.M., Van Bakel, P.J.T., Delsman, J.R., Massop, H.T.L., Kselik, R.A.L., Paulissen, M.P.C.P., Oude Essink, G.H.P., Hoogvliet, M.C., & Schipper, P.N.M. (2013). Zoetwatervoorziening in het Hoogheemraadschap van Rijnland; onderzoek met hulp van €ureyeopener 1.0. In Alterra-rapport 2439.
- 118 Stuyt, L.C.P.M., Van Bakel, P.J.T., Massop, H.T.M. (2011). Basic survey zout en joint fact finding effecten van zout. Naar een gedeeld beeld van het zoetwaterbeheer in laag Nederland. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2200.
- 119 Suárez, N. (2011). Effects of short- and long-term salinity on leaf water relations, gas exchange, and growth in *Ipomoea pes-caprae*. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 206(3), 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2010.05.006>.
- 120 Ten Haaf, C., & Pauw, E. (2021). Monitoring in Polder Callantsoog en Harger- en Pettemerpolder. *tussen Duin & Dijk* 2021(3), 18-21.

- 121 Ter Heerdt, G.N.J. (1995). Planten in de Peiling - Literatuuronderzoek naar de invloed van het zoutgehalte in de bodem op de ontwikkeling van helofyten -. RIZA notanr. 95.041, Lelystad.
- 122 Tobias, C. & Neubauer, S.C. (2009). Salt marsh biogeochemistry: an overview. Pages 445-492 in G.M.E. Perillo, E. Wolanski, D.R. Cahoon & M.M. Brinson, editors. Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- 123 Tosserams, M., Vulink, J.Th., & Coops, H. (1997). Peilbeheer Volkerak Zoommeer - Perspectief voor oeverplanten. Rapportage 'Planten in de Peiling' 1994-1997. RIZA Rapport 97.065 (ISBN: 90-369-5112-7), Lelystad.
- 124 Tzohar, D., Moshelion, M., & Ben-Gal, A. (2021). Compensatory hydraulic uptake of water by tomato due to variable root-zone salinity. *Vadose Zone J.* <https://doi.org/10.1002/vzj2.20161>.
- 125 Van Baaren, E.S., Delsman, J.R., Karaoulis, M., Pauw, P.S., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Dabekaussen, W., Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Siemon, B., Steuer, A., & Meyer, U. (2018). FRESHM Zeeland - FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland, Deltares report 1209220. Utrecht, Netherlands.
- 126 Van Baaren, E.S., Oude Essink, G.H.P., Janssen, G.M.C.M., De Louw, P.G.B., Heerdink, R., & Goes, B. (2016). Verzoeting en verzilting van het grondwater in de Provincie Zeeland; Regionaal 3D model voor zoet-zout grondwater. Deltares rapport 1220185-000-BGS-0003, Deltares, Utrecht.
- 127 Van Bakel, P.J.T., & Stuyt, L.C.P.M. (2011). Actualisering van de kennis van de zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van literatuuronderzoek, expertkennis en praktische ervaringen. Alterra, rapport 2201.
- 128 Van Calster, H., Cools, N., De Keersmaeker, L., Denys, L., Herr, C., Leyssen, A., Provoost, S., Vanderhaeghe, F., Vandevoorde, B., Wouters, J., & Raman, M. (2019). Gunstige abiotische bereiken voor vegetatietypes in Vlaanderen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2020 (44). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: doi.org/10.21436/inbor.19362510.
- 129 Van Dam, A.M., Clevering, ONDER ANDERE, Voogt, W., Aendekerk, Th.G.L., & van der Maas, M.P. (2007). Deelrapport leven met zout water. PPO nr 3234019400.
- 130 Van De Ven, G.P. (1993). Man-made lowlands: history of water management and land reclamation in the Netherlands. Uitg. Matrijs, Utrecht, Netherlands, 293.
- 131 Van den Burg, J. (1984). Zouttolerantie van populieren en wilgen. *Populier* 21(2): 42-47
- 132 Van der Welle, M.E., Roelofs, J.G. & Lamers, L.P. (2008). Multi-level effects of sulphur-iron interactions in freshwater wetlands in The Netherlands. *Science of the Total Environment*, 406(3), pp.426-429.
- 133 Van Diggelen, J.M.H., Lamers, L.P.M., Van Dijk, G., Schaafsma, M.J., Roelofs, J.G.M., & Smolders, A.J.P. (2014). New Insights into phosphorus mobilisation from sulphur-rich sediments: Time-Dependent effects of salinisation. *PLoS ONE*, 9, 15-19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111106>.
- 134 Van Dijk, G., Lamers, L.P., Loeb, R., Westendorp, P.-J., Kuiperij, R., van Kleef, H.H., Klinge, M., & Smolders, A.J. (2019). Salinization lowers nutrient availability in formerly brackish freshwater wetlands; unexpected results from a long-term field experiment. *Biogeochemistry*, 143, 67-83.

- 135 Van Dijk, G., Loeb, R., Smolders, A.J.P., & Klinge, M. (2013c). Verbrakking in voormalig brak laag Nederland: bedreiging of kans? H2O-Online, 28 maart 2013.
- 136 Van Dijk, G., Loeb, R., Smolders, A.J.P., & Westendorp, P. (2013b). Verbrakking in voormalig brak laag Nederland: bedreiging of kans? H2O-Online, 28 maart 2013.
- 137 Van Dijk, G., Loeb, R., Smolders, A.J.P., Bout, A., Roelofs, J.G.M., & Lamers, L.P.M. (2015). Salinization of coastal freshwater wetlands; effects of constant versus fluctuating salinity on sediment biogeochemistry. *Biogeochemistry*, 126, 71-84. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0140-1>.
- 138 Van Dijk, G., R. van 't Veer, H.H. van Kleef, A.J.P. Smolders, P. Westendorp, & C. Cusell (2017b). Verbrakking in het laagveenlandschap, fase III. VBNE Vereniging van Bos- en.
- 139 Van Dijk, G., R. van 't Veer, C. Cusell, M.A.E. Ursum (2024) Onderzoek naar herstelmaatregelen voor het behoud van brakke natuur in Polder Westzaan, W+B, B-WARE, 119268/24 - 013.661
- 140 Van Dijk, G., Westendorp, P.J., Loeb, R., Smolders, A., Lamers, L., Klinge, M., & van Kleef, H. (2013a). Verbrakking van het laagveen- en zeekleilandschap, van bedreiging naar kans? OBN rapportage, Bosschap, Ministerie van Economische Zaken, Directie Agro kennis.
- 141 Van Ek, R. (2016). Pilot Koopmanspolder: eindrapportage monitoring, Deltares rapport 1230049-004, Utrecht.
- 142 Van Ek, R., Doef, R., Bruin-Baerts, K., & van Nierop, A. (2017). Achteroevers: Lessen uit de Koopmanspolder, *Landschap* 2017(1), 15-23.
- 143 Van Geest, G. J., Arts, G. H. P., van Dijk, G., van Dam, H., van Riel, M., & van Smeden, J. (2022). *Systeemkennis brakke wateren* (No. 2022-39). Stowa.
- 144 Van Geest, G.J., Coops, H., & Scheffer, M. (2005). Long-term responses of aquatic vegetation to increased water-level fluctuations. *Archiv für Hydrobiologie*, 164(4), 479-496.
- 145 Van Straten, G., Bruning, B., De Vos, A.C., Parra Gonzales, A., Rozema, J., & van Bodegom, P.M. (2021). Estimating cultivar-specific salt tolerance model parameters from multi-annual field tests for identification of salt-tolerant potato cultivars. *Agricultural Water Management*, 252, 106902. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106902>.
- 146 Van Straten, G., De Vos, A.C., Rozema, J., Bruning, B., & van Bodegom, P.M. (2019). An improved methodology to evaluate crop salt tolerance from field trials. *Agricultural Water Management*, 213, 375-387.
- 147 Van 't Veer, R., D.M. Hoogeboom, A. Aptroot & J.P.C. van der Goes (2009). *Veenmosrietlanden in Natura 2000 gebieden van Laag Holland. Actualisering van de habitattypenkaart. Ecologisch advies- en onderzoeksbureau Van 't Veer & De Boer, Jisp, 65 pags + bijlagen.*
- 148 Van Vierssen, W. (1982): *The ecology of communities dominated by Zannichellia taxa in western Europe. Proef-schrift :Katholieke Universiteit, Nijmegen. 224p.*
- 149 Verhoeven, J.T.A. (1980) *The ecology of Ruppia-dominated communities in Western Europe. Proefschrift Katholieke Universiteit Nijmegen.*
- 150 Velstra, J., Van Staveren, G., Oosterwijk, J., Van der Werf, R., Tolck, L., & Groen, J. (2013). *Verziltingsstudie Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. Eindrapport februari 2013. Adviesbureau Acacia Water. Opdrachtgever Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.*

- 151 Velthuis, M., Teurlincx, S., Van Dijk, G., Smolders, A.J., & de Senerpont Domis, L.N. (2023). Salinisation effects on freshwater macrophyte growth and establishment in coastal eutrophic agricultural ditches. *Freshwater Biology*, 68(4), 547-560.
- 152 Vethaak, A. D. (2013). Disease prevalence in flounder (*Platichthys flesus*) from the Dutch Wadden Sea as indicator of environmental quality: A summary of 1988 – 2005 surveys. *Journal of Sea Research*, 82, 142-152.
- 153 Weston, N.B., Dixon, R.E., & Joye, S.B. (2006). Ramifications of increased salinity in tidal freshwater sediments: geo-chemistry and microbial pathways of organic matter mineralization. *J Geophys Res Biogeosciences*, 111, 1-14. <https://doi.org/10.1029/2005JG000071>.
- 154 Weston, N.B., Giblin, A.E., Banta, G.T., et al. (2010). The effects of varying salinity on ammonium exchange in estuarine sediments of the Parker River, Massachusetts. *Estuar Coasts*, 33, 985-1003.
- 155 Winter, H. V., Griffioen, A. B. & van Keeken, O. A. (2014). De Vismigratierivier: Bronnenonderzoek naar gedrag van vis rond zoet - zout overgangen. IMARES, IJmuiden, C035/14.
- 156 Witteveen+Bos (2009). Metingen vismigratie via de spuicomplexen in de Afsluitdijk.
- 157 Yang, J., Zhan, C., Li, Y., Zhou, D., Yu, Y., & Yu, J. (2018). Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China. *Science of the total environment*, 642, 946-953.
- 158 Zhao, C., Zhang, H., Song, C., Zhu, J-K., & Sergey, S. (2020). Mechanisms of Plant Responses and Adaptation to Soil Salinity, *The Innovation*, 1(1). <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100017>.
- 159 Zilt Proefbedrijf. (2017). Training programme 'The Salt Solution'-Saline agriculture creates new opportunities in Bangladesh, version September 2017, report.

BIJLAGE I

**VELDGEGEVENS VAN HET VOORKOMEN
VAN SOORTEN VEGETATIE IN RELATIE TOT
ZOUTGEHALTE**

TABEL I.1 HET VOORKOMEN VAN SOORTEN VEGETATIE ONDER VERSCHILLENDE ZOUTKLASSEN. DE GETALLEN ONDER DE ZOUTKLASSEN ZIJN IN PERCENTAGES VAN HET TOTAAL AANTAL WAARNEMINGEN 'N'. HET 90 % (MG CL/L) DUIDT OP HET ZOUTGEHALTE (IN MG CL/L) WAARONDER 90 % VAN DE WAARNEMINGEN ZIJN VERRICHT. DIT IS EEN MATE VOOR HET MAXIMALE ZOUTGEHALTE VAN EEN SOORT BINNEN DE NEDERLANDSE CONTEXT

Zoutklassen (mg/l)	0 - 50	50 - 100	100 - 195	195 - 301	301 - 993	993 - 3.013	3.013 - 9.926	9.926 - 7.725	17.725 - Inf	N	90 % (mg Cl/l)
Soortnaam											
<i>Soorten waarvan ten minste 90 % onder zoete condities (<300 mg Cl/L) groeit</i>											
sphagnum denticulatum	100	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20
ranunculus ololeucos	100	0	0	0	0	0	0	0	0	19	27
sphagnum cuspidatum	100	0	0	0	0	0	0	0	0	26	28
isoetes lacustris	100	0	0	0	0	0	0	0	0	5	30
utricularia minor	100	0	0	0	0	0	0	0	0	16	31
elatine hexandra	84	16	0	0	0	0	0	0	0	31	34
pilularia globulifera	83	17	0	0	0	0	0	0	0	38	36
luronium natans	89	8	3	0	0	0	0	0	0	64	38
potamogeton alpinus	82	18	0	0	0	0	0	0	0	28	38
hypericum elodes	91	9	0	0	0	0	0	0	0	60	39
nitella translucens	83	17	0	0	0	0	0	0	0	20	39
sparganium angustifolium	100	0	0	0	0	0	0	0	0	14	40
isoetes echinospora	100	0	0	0	0	0	0	0	0	13	44
myriophyllum alterniflorum	77	13	10	0	0	0	0	0	0	42	44
eleocharis acicularis	37	6	0	57	0	0	0	0	0	50	44
baldellia ranunculoides ssp. repens	88	12	0	0	0	0	0	0	0	25	44
lobelia dortmanna	83	17	0	0	0	0	0	0	0	26	45
nitella flexilis	88	12	0	0	0	0	0	0	0	25	45
nitella flexilis/opaca	88	12	0	0	0	0	0	0	0	12	47
eleogiton fluitans	40	6	0	53	0	0	0	0	0	51	48
ranunculus peltatus	75	11	13	0	0	0	0	0	0	28	49
callitriche brutia	81	10	9	0	0	0	0	0	0	25	49
sparganium natans	87	13	0	0	0	0	0	0	0	17	50
nitella capillaris	60	40	0	0	0	0	0	0	0	6	50
apium inundatum	70	30	0	0	0	0	0	0	0	18	50
potamogeton compressus	58	42	0	0	0	0	0	0	0	35	51
stratiotes aloides	57	14	9	0	20	0	0	0	0	92	51
ranunculus fluitans	61	39	0	0	0	0	0	0	0	17	53

Zoutklassen (mg/l)	0 - 50	50 - 100	100 - 195	195 - 301	301 - 993	993 - 3.013	3.013 - 9.926	9.926 - 7.725	17.725 - Inf	N	90 % (mg Cl/l)
Soortnaam											
<i>littorella uniflora</i>	72	28	0	0	0	0	0	0	0	70	57
<i>cabomba caroliniana</i>	51	49	0	0	0	0	0	0	0	11	59
<i>nitella mucronata</i>	78	22	0	0	0	0	0	0	0	7	60
<i>potamogeton obtusifolius</i>	50	25	25	0	0	0	0	0	0	80	60
<i>potamogeton natans</i>	28	11	14	45	2	0	0	0	0	152	61
<i>potamogeton gramineus</i>	45	10	44	0	0	0	0	0	0	31	65
<i>potamogeton coloratus</i>	41	59	0	0	0	0	0	0	0	13	65
<i>potamogeton acutifolius</i>	36	14	50	0	0	0	0	0	0	26	66
<i>ranunculus aquatilis</i> var. <i>aquatilis</i>	19	20	19	41	0	0	0	0	0	24	66
<i>nymphoides peltata</i>	29	55	16	0	0	0	0	0	0	34	68
<i>utricularia australis</i>	57	38	5	0	0	0	0	0	0	32	68
<i>hottonia palustris</i>	37	39	25	0	0	0	0	0	0	67	68
<i>ranunculus aquatilis</i> var. <i>diffusus</i>	40	60	0	0	0	0	0	0	0	12	69
<i>fontinalis antipyretica</i>	39	61	0	0	0	0	0	0	0	13	70
<i>myriophyllum aquaticum</i>	52	42	6	0	0	0	0	0	0	16	71
<i>crassula helmsii</i>	71	29	0	0	0	0	0	0	0	19	72
<i>myriophyllum heterophyllum</i>	27	73	0	0	0	0	0	0	0	19	72
<i>hippuris vulgaris</i>	10	51	0	0	39	0	0	0	0	19	72
<i>chara hispida</i>	33	53	13	0	0	0	0	0	0	35	73
<i>potamogeton lucens</i>	29	36	0	35	0	0	0	0	0	66	74
<i>nuphar lutea</i>	26	41	18	8	8	0	0	0	0	177	76
<i>potamogeton nodosus</i>	3	59	13	0	24	0	0	0	0	26	79
<i>potamogeton polygonifolius</i>	51	40	9	0	0	0	0	0	0	53	80
<i>hydrocharis morsus-ranae</i>	22	23	11	27	16	0	0	0	0	186	80
<i>potamogeton mucronatus</i>	28	37	35	0	0	0	0	0	0	26	81
<i>hydrocotyle ranunculoides</i>	13	87	0	0	0	0	0	0	0	16	81
<i>baldellia ranunculoides</i> ssp. <i>ranunculoides</i>	68	25	7	0	0	0	0	0	0	39	82
<i>nymphaea alba</i>	28	29	21	16	6	0	0	0	0	126	82
<i>ricciocarpus natans</i>	29	71	0	0	0	0	0	0	0	11	83
<i>ranunculus hederaceus</i>	33	35	32	0	0	0	0	0	0	15	83
<i>sagittaria sagittifolia</i>	19	30	5	29	17	0	0	0	0	88	84

Zoutklassen (mg/l)	0 - 50	50 - 100	100 - 195	195 - 301	301 - 993	993 - 3.013	3.013 - 9.926	9.926 - 7.725	17.725 - Inf	N	90 % (mg Cl/l)
Soortnaam											
utricularia intermedia	53	48	0	0	0	0	0	0	0	8	85
chara virgata	37	19	37	0	7	0	0	0	0	31	89
callitriche platycarpa	24	25	22	29	0	0	0	0	0	47	90
sparganium emersum	17	21	6	44	12	0	0	0	0	75	91
nymphaea alba ssp. candida	22	6	0	71	0	0	0	0	0	10	91
azolla filiculoides	16	77	8	0	0	0	0	0	0	10	95
groenlandia densa	27	36	37	0	0	0	0	0	0	24	98
utricularia vulgaris	8	35	11	25	20	0	0	0	0	46	105
callitriche obtusangula	28	17	34	0	17	0	5	0	0	78	105
wolffia arrhiza	6	58	35	0	0	0	0	0	0	18	105
potamogeton trichoides	6	22	7	40	2	22	0	0	0	45	108
ludwigia grandiflora	13	21	15	0	50	0	0	0	0	15	108
chara aspera	9	37	54	0	0	0	0	0	0	24	118
potamogeton berchtoldii	18	4	78	0	0	0	0	0	0	23	119
myriophyllum verticillatum	19	24	39	0	19	0	0	0	0	43	120
chara contraria	9	6	85	0	0	0	0	0	0	20	124
chara globularis	16	13	34	19	19	0	0	0	0	82	124
nitella hyalina	11	1	88	0	0	0	0	0	0	12	124
nitellopsis obtusa	2	3	94	0	0	0	0	0	0	19	125
zannichellia palustris ssp. palustris	9	6	57	19	9	0	0	0	0	28	125
lemna turionifera	2	43	55	0	0	0	0	0	0	11	126
ranunculus circinatus	13	22	40	0	4	20	0	0	0	42	127
persicaria amphibia	15	18	14	23	8	22	0	0	0	54	128
elodea nuttallii	15	21	15	33	16	0	0	0	0	336	130
riccia fluitans	26	6	67	0	0	0	0	0	0	14	130
spirodela polyrhiza	8	32	16	10	7	26	0	0	0	123	143
potamogeton perfoliatus	5	24	39	15	16	0	0	0	0	46	160
elodea canadensis	19	13	16	25	25	4	0	0	0	57	176
cladophora	7	6	26	36	25	0	0	0	0	25z	187
chara vulgaris	11	27	9	8	45	0	0	0	0	44	194
lemna minuta	7	27	15	27	4	20	0	0	0	31	264

Zoutklassen (mg/l)	0 - 50	50 - 100	100 - 195	195 - 301	301 - 993	993 - 3.013	3.013 - 9.926	9.926 - 7.725	17.725 - Inf	N	90 % (mg Cl/l)
Soortnaam											
lemna trisulca	7	14	5	31	14	30	0	0	0	125	273
draadwier	10	13	16	20	20	0	9	0	12	40	282
alisma gramineum	11	11	8	0	70	0	0	0	0	7	289
lemna minor	7	9	26	19	25	10	3	1	0	197	292
<i>Soorten waarvan ten minste 90 % onder zwak brakke condities (<1.000 mg Cl/l) groeit</i>											
ceratophyllum demersum	6	14	17	24	28	11	0	0	0	186	340
lemna gibba	5	19	10	15	18	24	9	0	0	85	362
potamogeton pusillus	4	10	24	29	15	15	0	0	2	59	366
najas marina	1	5	32	24	38	0	0	0	0	18	433
potamogeton crispus	3	7	14	25	35	13	0	0	3	43	491
myriophyllum spicatum	5	7	12	20	25	18	6	7	0	78	496
callitriche stagnalis	7	14	0	0	28	51	0	0	0	15	523
callitriche	2	0	9	28	58	3	0	0	0	32	606
ceratophyllum submersum	5	4	5	8	15	63	0	0	0	18	830
<i>Soorten waarvan ten minste 90 % onder brakke condities (<3.000 mg Cl/l) groeit</i>											
potamogeton pectinatus	2	5	7	12	25	33	9	7	0	143	1.756
enteromorpha	0	1	0	14	33	42	10	0	0	21	1.972
chara connivens	0	4	32	0	29	0	35	0	0	6	2.027
chara canescens	0	0	2	0	32	53	13	0	0	9	2.650
ranunculus baudotii	0	3	9	12	14	38	23	0	0	15	2.919
<i>Soorten waarvan ten minste 90 % onder sterk brakke tot zoute condities (<20.000 mg Cl/l) groeit</i>											
flab	7	10	5	21	3	16	15	11	11	79	4.280
zannichellia palustris ssp. pedicellata	0	1	1	14	15	40	25	4	0	35	10.250
ruppia maritima	0	0	0	0	3	12	39	37	9	30	16.345
ruppia cirrhosa	0	0	0	0	0	0	51	28	21	21	19.597
Zoute soorten											
zostera marina	0	0	0	0	0	0	0	34	66	15	22.084
zostera noltei	0	0	0	0	0	0	0	28	72	19	23.008
ulva	0	0	0	0	0	0	0	47	53	7	23.496

BIJLAGE II

**VELDGEGEVENS VAN HET VOORKOMEN VAN
SOORTEN VEGETATIE IN RELATIE TOT HET
AMMONIAKGEHALTE**

TABEL II.1 HET VOORKOMEN VAN SOORTEN VEGETATIE ONDER VERSCHILLENDE KLASSEN AMMONIAK NH₃. DE GETALLEN ONDER DE AMMONIAKKLASSEN ZIJN IN PERCENTAGES VAN HET TOTAAL AANTAL WAARNEMINGEN 'N'. HET 90 % NH₃ (UMOL) DUIDT OP HET AMMONIAKGEHALTE (IN UMOL/L) WAARONDER 90 % VAN DE WAARNEMINGEN ZIJN VERRICHT. DIT IS EEN MATE VOOR HET MAXIMALE AMMONIAKGEHALTE VAN EEN SOORT BINNEN DE NEDERLANDSE CONTEXT

NH ₃ klassen (umol/l)	0 - 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5 - 1	1 - 2.5	2.5 - 5	5 - 8	8 - Inf	N	90 % NH ₃ (umol/l)
Soortnaam										
<i>sparganium angustifolium</i>	100	0	0	0	0	0	0	0	12	0,00
<i>ranunculus ololeucos</i>	52	0	0	0	0	48	0	0	19	0,02
<i>isoetes lacustris</i>	100	0	0	0	0	0	0	0	5	0,02
<i>lobelia dortmanna</i>	100	0	0	0	0	0	0	0	19	0,03
<i>potamogeton alpinus</i>	54	28	0	18	0	0	0	0	19	0,10
<i>hypericum elodes</i>	55	3	5	9	0	0	28	0	55	0,12
<i>sphagnum cuspidatum</i>	54	0	12	0	33	0	0	0	17	0,14
<i>azolla filiculoides</i>	46	19	35	0	0	0	0	0	10	0,16
<i>potamogeton mucronatus</i>	27	50	0	0	24	0	0	0	16	0,16
<i>potamogeton compressus</i>	35	42	0	23	0	0	0	0	22	0,17
<i>nitella capillaris</i>	21	79	0	0	0	0	0	0	4	0,19
<i>utricularia intermedia</i>	57	21	22	0	0	0	0	0	5	0,21
<i>cabomba caroliniana</i>	23	30	47	0	0	0	0	0	11	0,22
<i>utricularia minor</i>	53	0	47	0	0	0	0	0	6	0,25
<i>groenlandia densa</i>	39	18	13	0	30	0	0	0	24	0,27
<i>nymphaea alba</i>	28	34	14	12	5	8	0	0	61	0,27
<i>fontinalis antipyretica</i>	27	52	21	0	0	0	0	0	10	0,28
<i>potamogeton acutifolius</i>	30	36	34	0	0	0	0	0	22	0,34
<i>stratiotes aloides</i>	36	15	25	8	16	0	0	0	53	0,34
<i>ricciocarpos natans</i>	73	0	27	0	0	0	0	0	11	0,35
<i>ranunculus hederaceus</i>	51	24	14	0	0	11	0	0	12	0,38
<i>ranunculus peltatus</i>	25	36	18	11	10	0	0	0	19	0,38
<i>hydrocotyle ranunculoides</i>	59	11	27	4	0	0	0	0	15	0,41
<i>callitriche</i>	15	45	22	18	0	0	0	0	14	0,43
<i>wolffia arrhiza</i>	19	19	36	22	4	0	0	0	18	0,45
<i>ranunculus aquatilis</i> var. <i>diffusus</i>	15	26	59	0	0	0	0	0	12	0,46
<i>draadwier</i>	28	9	29	8	5	21	0	0	34	0,46

NH ₃ klassen (umol/l)	0 - 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5 - 1	1 - 2.5	2.5 - 5	5 - 8	8 - Inf	N	90 % NH ₃ (umol/l)
Soortnaam										
nitella flexilis/opaca	24	25	29	23	0	0	0	0	12	0,53
callitriche platycarpa	20	25	21	24	10	0	0	0	36	0,56
riccia fluitans	24	0	0	25	0	51	0	0	11	0,56
potamogeton obtusifolius	15	22	16	23	10	14	0	0	41	0,56
chara connivens	0	0	85	15	0	0	0	0	4	0,58
hydrocharis morsus-ranae	22	24	26	16	9	3	0	0	128	0,58
potamogeton nodosus	9	10	40	26	15	0	0	0	22	0,58
potamogeton polygonifolius	44	15	7	12	8	14	0	0	42	0,59
callitriche brutia	42	10	0	13	0	34	0	0	23	0,59
callitriche stagnalis	14	13	28	23	0	23	0	0	15	0,60
eleogiton fluitans	27	11	10	25	9	18	0	0	43	0,60
pilularia globulifera	35	16	10	20	19	0	0	0	29	0,60
nitella hyalina	16	0	58	23	3	0	0	0	11	0,61
lemna minuta	16	17	13	21	8	25	0	0	26	0,63
utricularia australis	33	2	11	50	0	4	0	0	29	0,65
sagittaria sagittifolia	18	27	17	24	6	7	0	0	63	0,66
nuphar lutea	19	24	22	20	9	6	0	0	103	0,72
myriophyllum aquaticum	25	4	22	0	13	36	0	0	16	0,74
callitriche obtusangula	21	24	18	8	18	12	0	0	51	0,80
nitella mucronata	2	6	0	93	0	0	0	0	4	0,80
nymphoides peltata	14	38	12	12	23	0	0	0	21	0,81
ludwigia grandiflora	23	19	39	0	19	0	0	0	15	0,84
luronium natans	27	13	7	3	5	12	33	0	33	0,86
sparganium emersum	15	22	27	18	2	17	0	0	50	0,87
myriophyllum heterophyllum	22	9	12	29	27	0	0	0	19	0,88
lemna minor	13	24	19	22	11	12	0	0	124	1,01
ranunculus circinatus	15	19	16	23	26	0	0	0	36	1,01
myriophyllum verticillatum	9	27	17	30	16	0	0	0	27	1,01
potamogeton trichoides	12	9	32	18	17	12	0	0	36	1,02
spirodela polyrhiza	11	24	25	21	10	7	0	2	107	1,03

NH ₃ klassen (umol/l)	0 - 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5 - 1	1 - 2.5	2.5 - 5	5 - 8	8 - Inf	N	90 % NH ₃ (umol/l)
Soortnaam										
hottonia palustris	18	21	25	9	6	23	0	0	51	1,07
lemna gibba	10	23	28	24	12	3	0	0	73	1,08
lemna trisulca	16	17	25	18	13	12	0	0	97	1,10
potamogeton natans	19	16	14	13	9	19	11	0	100	1,10
nitella flexilis	26	13	10	12	30	9	0	0	19	1,14
nymphaea alba ssp. candida	44	0	0	29	27	0	0	0	9	1,16
elodea nuttallii	14	16	18	20	19	5	8	0	223	1,24
hippuris vulgaris	12	39	10	27	13	0	0	0	16	1,25
crassula helmsii	23	0	9	0	10	0	59	0	18	1,28
nitellopsis obtusa	0	6	19	45	29	0	0	0	18	1,29
najas marina	4	18	15	25	38	0	0	0	19	1,31
utricularia vulgaris	4	17	29	9	41	0	0	0	26	1,32
chara globularis	8	18	19	27	8	19	0	0	62	1,34
alisma gramineum	0	0	9	0	91	0	0	0	3	1,35
potamogeton lucens	13	12	11	31	15	18	0	0	40	1,41
apium inundatum	23	9	16	14	9	29	0	0	17	1,41
lemna turionifera	12	20	33	0	35	0	0	0	11	1,43
sparganium natans	15	2	24	0	24	36	0	0	14	1,53
ceratophyllum demersum	9	21	22	9	28	6	0	5	91	1,54
persicaria amphibia	9	15	15	13	13	35	0	0	41	1,54
elatine hexandra	19	0	0	23	0	0	58	0	19	1,65
potamogeton perfoliatus	13	10	21	29	26	0	0	0	33	1,71
nitella translucens	17	4	6	11	0	22	41	0	18	1,75
elodea canadensis	10	10	7	22	13	19	10	9	53	1,76
isoetes echinospora	48	0	0	11	0	0	41	0	8	1,91
chara aspera	6	6	18	26	45	0	0	0	22	1,93
chara contraria	8	17	17	23	34	0	0	0	19	2,00
chara vulgaris	3	19	25	1	24	26	0	3	38	2,14
chara virgata	10	21	6	6	24	33	0	0	26	2,17
potamogeton pectinatus	3	11	17	10	38	11	7	3	82	2,18

NH ₃ klassen (umol/l)	0 - 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5 - 1	1 - 2.5	2.5 - 5	5 - 8	8 - Inf	N	90 % NH ₃ (umol/l)
Soortnaam										
potamogeton berchtoldii	9	14	19	15	16	27	0	0	21	2,22
littorella uniflora	22	6	9	7	18	28	10	0	50	2,25
potamogeton gramineus	20	5	6	15	35	12	9	0	26	2,36
myriophyllum spicatum	5	19	12	20	15	29	0	0	64	2,38
baldellia ranunculoides ssp. ranunculoides	10	9	11	9	30	31	0	0	32	2,49
myriophyllum alterniflorum	3	7	4	27	19	41	0	0	31	2,55
zannichellia palustris ssp. palustris	9	7	12	21	11	14	15	12	33	2,72
ceratophyllum submersum	2	12	21	10	24	32	0	0	16	2,77
chara hispida	3	20	14	19	13	30	0	0	27	3,00
potamogeton coloratus	0	10	0	7	28	55	0	0	11	3,15
potamogeton pusillus	3	14	10	6	18	34	0	15	43	3,24
ranunculus baudotii	0	0	4	27	11	37	0	22	13	3,24
eleocharis acicularis	5	2	23	10	17	9	33	0	33	3,45
ranunculus aquatilis var. aquatilis	4	14	14	16	28	19	0	5	20	3,53
chara canescens	0	0	0	20	11	10	58	0	6	4,35
flab	8	8	6	11	16	15	7	28	69	4,41
baldellia ranunculoides ssp. repens	11	4	0	18	0	0	67	0	12	4,63
potamogeton crispus	4	7	6	0	15	9	9	49	22	4,83
zannichellia palustris ssp. pedicellata	0	7	11	18	18	7	3	37	22	5,20
enteromorpha	0	0	24	35	14	0	0	26	9	6,36
ulva	0	0	0	0	10	14	62	14	7	8,48
ruppia cirrhosa	0	0	5	0	8	2	31	54	17	15,68
ruppia maritima	0	4	1	2	7	24	32	30	21	17,67
zostera noltei	0	0	0	0	2	13	41	44	19	23,97
zostera marina	0	0	0	4	5	13	44	34	15	42,34

BIJLAGE III

**BESCHIKBARE KENNIS EN KENNISLEEMTEN
HYDROLOGISCH EN BIOGEOCHEMISCH
FUNCTIONEREN IN AQUATISCHE EN
TERRESTRISCHE NATUUR**

TABEL III.1 BESCHIKBARE KENNIS EN KENNISLEEMTEN OVER HET HYDROLOGISCH EN BIOGEOCHEMISCH FUNCTIONEREN VAN DE ZOET-ZOUT DYNAMIEK IN AQUATISCHE EN TERRESTRISCHE NATUUR

Auteur	Jaartal	Titel	Reikwijdte	Belangrijkste conclusies	Kennisleemte
Paulissen, M.P.C.P. & E.P.A.G. Schouwenberg, m.m.v. G.W.W. Wamelink	2007	zouttolerantie van zoetwatergevoede natuurdoeltypen; verkenning en kennislacunes. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1545	laag Nederland, natuurdoeltypen	breed overzicht over zowel aquatische als terrestrische natuur. Aanzet voor invulling gevoeligheid en hersteltijden	in de literatuur worden grote verschillen in zouttolerantie beschreven. Contrasterende resultaten voor chloriderange en gevoeligheid voor verzilting zoals gevonden voor aquatische en bosnatuurdoeltypen moeten deels worden toegeschreven aan kennislacunes op het terrein van gevoeligheden voor verzilting. Voor fauna is hersteltijd veelal onbekend
Dobben, H.F. van, J.A.M. Janssen & A.M. Schmidt	2008	structuur en Functie van Habitattypen: Nadere definiëring en monitoring in het kader van de Habitatrictlijn. Deel II: kritische condities en wijze van monitoring. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1561	habitattypen	inzicht in welke habitattypen afhankelijk zijn van zilte omstandigheden. Er is een databank Ecologische randvoorwaarden habitattypen waarbij per kenmerkende plantengemeenschap optimum voor saliniteit is aangegeven	algemeen inzicht in gevoeligheid voor zout, maar locatiespecifieke condities kunnen bepalend zijn (lees: maatwerk per gebied)
Runhaar, H. & S. Hennekens	2014	'hydrologische Randvoorwaarden Natuur' Versie 3, Gebruikershandleiding, Januari 2014. Zie https://www.synbiosys.alterra.nl/waternood/	koppeling met verschillende indelingssystemen	bruikbaar overzicht irt indeling zoutgehalte in saliniteitsklassen	
Runhaar, J., M. van der Linden & J.P.M. Witte	1997	waterplanten en saliniteit. RIZA rapport 96.063. RIZA, Lelystad	CML-ecotopensysteem	er wordt gewezen op belang opbouw databestand voor afleiden milieupreferenties (= correlatief onderzoek). Kijk niet alleen binnen NL voor data	voor terrestrisch is van belang hoe zout is gemeten. Is nu vaak niet eenduidig waardoor er 'ruis' ontstaat in afgeleide relaties
Van Geest, G. J., Arts, G. H. P., van Dijk, G., van Dam, H., van Riel, M., & van Smeden, J. (2022)	2022	systeemkennis Brakke wateren	behandeld fytoplankton, waterplanten, macrofauna, vis, met duidelijke nadruk op waterplanten	zoutfluctuaties spelen grote rol in NL wateren, evenals de concentraties van sulfiden in waterbodem en ammoniak in oppervlaktewater	onduidelijk welke bijdragen zoutfluctuaties, sulfiden en ammoniak hebben in verspreiding van soorten in brakke wateren. Referentiebeeld van brakke wateren is onvoldoende bekend. Duidelijke kennislacunes tav macrofauna.
Verhoeven, J.T.A.	1980	the ecology of Ruppia-dominated communities in Western Europe	behandelt de ecologie en abiotische randvoorwaarden van Ruppia-vegetaties in West-Europa		

Auteur	Jaartal	Titel	Reikwijdte	Belangrijkste conclusies	Kennisleemte
Van Vierssen, W.	1982	the ecology of communities dominated by Zannichellia taxa in Western Europe	behandelt de ecologie en abiotische randvoorwaarden van Zannichellia-vegetaties in West-Europa		
Runhaar, J., W. van Landuyt, C.L.G. Groen, E.J. Weeda & F. Verloove	2004	herziening van de indeling in ecologische soortengroepen voor Nederland en Vlaanderen. Gorteria 30: 12-26. https://www.synbiosys.alterra.nl/ecotopen/	CML-ecotopensysteem in NL en Vlaanderen	toedeling soorten aan ecotoopgroepen	zie boven. Nu wel een globale indeling in klassen
Cusell, C., R. van Ek, J. Mandemakers & M. Klinge	2018	markiezaatsmeer. Nader onderzoek natuur en waterkwaliteit, W+B rapport 102512/18-006.519, Deventer	markiezaat	inzicht in voorkomen zout in terrestrische deel (tot en met oeverlijn)	
Röling, Y.J.B.	1994	markiezaat 10 jaar afgesloten. Flevobericht 351, Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, Lelystad	markiezaat	waardevol overzicht historische ontwikkeling	
Ten Haaf, C. & E. Pauw	2021	monitoring in Polder Callantsog en Harger- en Pettemerpolder. tussen Duin & Dijk 2021(3): 18-21	polder Callantsog, Harger- en Pettemerpolder	inzicht in functioneren obv metingen. Geen negatieve gevolgen aanleg strand bij Pettemerzeedijk	
Jansen, M.	1998	productie, transport en depositie van zoutspray in de kustzone. WL Delft Hydraulics Z2329, studie in het kader van Maasvlakte 2	kustzone	inzicht in effecten seaspray	
Bal, D., Beije, H. M., Fellingner, M., Haveman, R., van Opstal, A. J. F. M., & van Zadelhoff, F. J.	2001	handboek natuurdoeltypen; 2e geheel herz. ed. (Rapport / Expertisecentrum LNV; No. 2001/020). Ministerie van LNV	overzicht systematiek en indeling natuurdoeltypen	relatie met abiotiek	
Barendregt, A., M.J. Wassen, J.T. de Smidt & E. Lippe	1986	ingreep-effectvoorspelling voor waterbeheer. Landschap 3:41-55	laagveen	inzicht effect waterkwaliteit op relatief voorkomen soorten (met gemiddelde responsfunctie)	dorrelatief model, maar causale relaties onderbelicht. Daardoor vraagtekens bij voorspellende waarde. Model alleen toepasbaar binnen gebied waar de waarnemingen zijn gedaan
Barendregt, A. & A. van Leerdam	1990	het hydro-ecologisch voorspellingsmodel ICHORS (versie 3.3) voor de provincie Zuid-Holland /- Utrecht Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht. ISBN 90-6266-126-2	Zuid-Holland	mesotroof laagveen erg gevoelig voor chloride concentraties	
Bootsma, M.C., Van Den Broek, T., Barendregt, A. & Beltman, B.	2002	rehabilitation of acidified floating fens by addition of buffered surface water. Restoration Ecology, 10, 112-121	veengebieden Noord-Holland	inzicht in intrusie van oppervlaktewater in percelen in Ilperveld	
Van Dijk, G., Westendorp, P.J., Loeb, R., Smolders, A., Lamers, L., Klinge, M., & H. van Kleef	2013	verbrakking van het laagveen- en zeekleilandschap, van bedreiging naar kans? OBN rapportage, Bosschap, Ministerie van Economische Zaken, Directie Agro kennis	laagveen- en zeekleilandschap	invloed zoutgehalten op nutriëntconcentraties in veen- en kleibodems. In zowel de veen als kleibodems bleken orthofosfaat- en totaal fosforconcentraties in verbrakte bodems veel lager ten opzichte van de zoete waterbodems	
Van Dijk, G., Loeb, R., Smolders, A.J.P. & P. Westendorp	2013	verbrakking in voormalig brak laag Nederland: bedreiging of kans? H ² O-Online 28 maart 2013	zie boven		

Auteur	Jaartal	Titel	Reikwijdte	Belangrijkste conclusies	Kennisleemte
Herbert, E.R., Boon, P., Burgin, A.J., Neubauer, S.C., Franklin, R.B., Ardón, M., Hopfensperger, K.N., Lamers, L.P. and Gell, P.	2015	a global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands	wereldwijde review over effecten van verzilting op coastal wetlands		
Van Dijk, G. Van Dijk, G., R. van 't Veer, C. Cusell, M.A.E. Ursum	2024	onderzoek naar herstelmaatregelen voor het behoud van brakke natuur in Polder Westzaan	Nederland, Noord-Holland, Polder Westzaan	experimentele effecten van verbrakking in Polder Westzaan (biogeochemie, vegetatie, broeikasgasemissies). Historische effecten van verbrakking en verzoeting in brakwatervenen	
Galvan-Ampudia, C.S., M.M. Julkowska, E. Darwish, J. Gandullo, R.A. Korver, G. Brunoud, M.A. Haring, T. Munnik, T. Vernoux & C. Testerink	2013	halotropism is a response of plant roots to avoid a saline environment. <i>Current Biology</i> 23: 2044-2050. http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2013.08.042		plantenwortels kunnen actief reageren op verdeling zout in de ondergrond	
Van Calster H., Cools N., De Keersmaecker L., Denys L., Herr C., Leyssen A., Provoost S., Vanderhaeghe F., Vandevoorde B., Wouters J. en M. Raman, 2019.	2019	gunstige abiotische bereiken voor vegetatietypes in Vlaanderen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2020 (44). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: doi.org/10.21436/inbor.19362510	brakke habitattypen	inzicht in zoutbereik voor habitattypen van schorren en slikken. Beheer is van invloed op de vegetatiesamenstelling (bijvoorbeeld zonder begrazing toename riet tov zilt grasland). Naast zoutgehalte is hydrodynamiek sterk bepalend voor saliniteit standplaats	
Van Ek, R.	2016	pilot Koopmanspolder: eindrapportage monitoring, Deltares rapport 1230049-004, Utrecht		belang van peilbeheer in relatie tot (het onderdrukken van) brakke kwel	
Van Ek, R., R. Doef, K. Bruin-Baerts & A. van Nierop	2017	achterevers: Lessen uit de Koopmanspolder, <i>Landschap</i> 2017(1): 15-23		idem	
Stofberg, S. F.	2017	hydrological controls on salinity exposure and the effects on plants in lowland polders. [internal PhD, WU, Wageningen University]. Wageningen University. https://doi.org/10.18174/413397		proefschrift gericht op het inschatten van verzilting in natuurgebieden met zoute kwel en laagveenverlandingen, en de effecten van verhoogde zoutconcentraties op plantensoorten van laagvenen. Er is een kasexperiment uitgevoerd waarin plantensoorten van wortelmatten (<i>Comarum palustre</i> , <i>Myosotis scorpioides</i> , <i>Succisa pratensis</i> , <i>Thelypteris palustris</i> en <i>Viola palustris</i>) werden blootgesteld aan verschillende zoutgehalten. Zoutconcentraties boven 500 mg l-1 Cl- resulteerden in groeivermindering bij drie van deze soorten	de resultaten laten zien dat relatief lage concentraties al effect kunnen hebben tijdens relatief korte perioden. Als het oppervlaktewater in de polders met natuurgebieden zouter wordt, bijvoorbeeld van 100 tot 200 Cl mg Cl/l, dan zullen plantensoorten aan de randen van wortelmatten waarschijnlijk blootgesteld worden. De vegetatie op de rand kan door relatief lage zoutgehalten beïnvloed worden in minder dan twee maanden

Auteur	Jaartal	Titel	Reikwijdte	Belangrijkste conclusies	Kennisleemte
Van Baaren E.S., G.H.P. Oude Essink, G.M.C.M. Janssen P.G.B. de Louw, R. Heerdink & B. Goes.	2016	verzoeting en verzilting van het grondwater in e Provincie Zeeland; Regionaal 3D model voor zoet-zout grondwater. Deltares rapport 1220185-000-BGS-0003, Deltares, Utrecht	Zeeland	inzicht in abiotische processen (dunne regenwaterlenzen, waterbellen in zandkreeken)	
Pijlman, J., J. Sleiderink, J. Deru, M. van Agtmaal	2021	literatuurstudie naar de toepassing van zilt slib en zouttoevoeging op veen, Publicatienummer 2021-016 LbD, Louis Bolk Instituut		invloed saliniteit op veenafbraak en rol van slib	focus op agrarische praktijk. Niet zo zeer natuur
Brouns, K., J. T. A. Verhoeven en M. M. Hefting	2014	the effects of salinization on aerobic and anaerobic decomposition and mineralization in peat meadows: The roles of peat type and land use. Journal of Environmental Management 143, 44-53		verzilting verminderd aerobe afbraak, maar anaerobe afbraak veranderde niet. Landgebruik en type veen maakte geen verschil. Waterkwaliteit zal wel veranderen door verzilting in veenweidegebied (toename NH ₄ , PO ₄ en afname DOC)	
Yang, J., Zhan, C., Li, Y., Zhou, D., Yu, Y., & Yu, J.	2018	effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China. Science of the total environment, 642, 946-953		effecten van saliniteit op bodemademhaling in estuarien wetland. Afname bodemademhaling by saliniteit > 5‰. Dit is vermoedelijk meer afhankelijk van microbiele samenstelling dan DOC. Er is mogelijk een grenswaarde voor bodemademhaling in brakke wetlands	
Runhaar, H.	2006	natuur in de verdringingsreeks. Alterra rapport 1302, Wageningen		onomkeerbare effecten bij verzilting in obliagaat zoete ecosystemen	
Runhaar, J., Arts G., Knol W., Makaske B. & Van den Brink N.	2004	waterberging en natuur. Kennisoverzicht ten behoeve van regionale waterbeheerders. Rapport 2004-16. STOWA, Utrecht		inzicht in processen relevant bij waterberging in natuurgebieden	
Broekmeyer, M.E.A., Schouwenberg E.P.A.G., Van der Veen M., Prins D. & Vos C.	2006	effectenindicator Natura 2000-gebieden; achtergronden en verantwoording ecologische randvoorwaarden en storende factoren. Alterra-rapport 1375. Alterra, Wageningen		abiotische randvoorwaarden en Indicatie effecten agv hogere chloridewaarden	

BIJLAGE IV

VAATPLANTEN IN TERRESTRISCHE NATUUR

INGEDEELD NAAR ZOUTPREFERENTIE

Voor de selectie is gebruik gemaakt van meerdere lijsten (onder andere CML lijst met kenmerkende soorten per ecotooptype).

TABEL IV.1 HALOFYTEN KENMERKEND VOOR EEN ZOUT MILIEU

CBS nr	Nederlandse naam	Wetenschappelijke naam
1024	blauw kweldergras	puccinellia fasciculata
1027	bleek kweldergras	puccinellia distans subsp. borealis
5159	dicht langbaardgras	vulpia fasciculata
1028	dichtbloemig kweldergras	puccinellia rupestris
1025	gewoon kweldergras	puccinellia maritima
1635	kortarige zeekraal	salicornia europaea
738	lamsoor	limonium vulgare
1636	langarige zeekraal	salicornia procumbens
581	melkkruid	glaux maritima
1256	schorrenkruid	suaeda maritima
1127	stekend loogkruid	salsola kali subsp. kali
1023	stomp kweldergras	puccinellia distans subsp. distans
2400	stomp kweldergras s.l.	puccinellia distans
122	strandmelde	atriplex littoralis
100	zeealsem	seriphidium maritimum
634	zeepostelein	honckenya peploides
948	zeeweegbree	plantago maritima
1238	zilte schijnspurrie	spergularia marina
117	zulte	aster tripolium

TABEL IV.2 ZOUTTOLERANTE SOORTEN (FACULTATIEVE EN INDIFFERENTE HALOFYTEN)

CBS nr	Nederlandse naam	Wetenschappelijke naam
1300	aardbeiklaver	trifolium fragiferum
879	addertong	ophioglossum vulgatum
248	blauwe zegge	carex panicea
842	deens lepelblad	cochlearia danica
1630	dodemansvingers	oenanthe crocata
917	dunstaart	parapholis strigosa
261	dwergzegge	carex oederi subsp. oederi
343	echt lepelblad	cochlearia officinalis subsp. officinalis
2428	eenbloemige zeekraal	salicornia pusilla
1048	egelboterbloem	ranunculus flammula
91	engels gras	armeria maritima
341	engels lepelblad	cochlearia officinalis
18	fioringras	agrostis stolonifera
2143	gebogen kransblad	chara connivens
595	gesteelde zoutmelde	atriplex pedunculata
641	gewone waternavel	hydrocotyle vulgaris
596	gewone zoutmelde	atriplex portulacoides
1025	gewoon kweldergras	puccinellia maritima
66	gewoon reukgras	anthoxanthum odoratum
675	greppelrus	juncus bufonius
785	grote kattenstaart	lythrum salicaria
43	heemst	althaea officinalis
1156	heen	bolboschoenus maritimus
944	hertshoornweegbree	plantago coronopus
877	kattedoorn	ononis repens subsp. spinosa
1317	kleine lisdodde	typha angustifolia
1215	kleine watereppe	berula erecta
1056	kruipe boterbloem	ranunculus repens
120	kustmelde	atriplex glabriuscula
231	kwelderzegge	carex extensa
738	lamsoor	limonium vulgare
1112	liggende vetmuur	sagina procumbens
581	melkkruid	glaux maritima
1311	moeraszoutgras	triglochin palustris
688	paddenrus	juncus subnodulosus
3	poppenorchis	aceras anthropophorum
933	riet	phragmites australis
514	rietzwenkgras	festuca arundinacea
1158	rode bies	blysmus rufus
509	rode ogentroost	odontites vernus
520	rood zwenkgras	festuca rubra
959	ruw beemdgras	poa trivialis
1161	ruwe bies	schoenoplectus tabernaemontani
1310	schorrezoutgras	triglochin maritima
76	selderij	apium graveolens
1111	sierlijke vetmuur	sagina nodosa
440	slanke waterbies	eleocharis uniglumis
762	smalle rolklaver	lotus glaber
121	spiesmelde	atriplex prostrata
1152	stekende bies	schoenoplectus pungens

CBS nr	Nederlandse naam	Wetenschappelijke naam
1093	veldzuring	rumex acetosa
1369	vogelwikke	vicia cracca
506	vroege ogentroost	odontites vernus subsp. litoralis
226	waardzegge	carex divisa
1135	waterpunge	samolus valerandi
100	zeealsem	seriphidium maritimum
635	zeegerst	hordeum marinum
343	zeemelkdistel	sonchus arvensis var. maritimus
685	zeerus	juncus maritimus
948	zeeweegbree	plantago maritima
870	zilt torkruid	oenanthe lachenalii
671	zilte greppelrus	juncus ambiguus
683	zilte rus	juncus gerardii
1238	zilte schijnspurrie	spargularia marina
224	zilte zegge	carex distans
1006	zilverschoon	potentilla anserina
1006	zilverschoon	potentilla anserina
673	zomprus	juncus articulatus
117	zulte	aster tripolium
36	zwarte els	alnus glutinosa
244	zwarte zegge	carex nigra

TABEL IV.3 ZOUTINTOLERANTE SOORTEN (GLYCOFYTEN)

CBS nr	Nederlandse naam	Wetenschappelijke naam
1258	blauwe knoop	succisa pratensis
239	draadzegge	carex lasiocarpa
337	galigaan	cladium mariscus
865	gele plomp	nuphar lutea
187	gewone dotterbloem	caltha palustris
1327	groot blaasjeskruid	utricularia vulgaris
1051	grote boterbloem	ranunculus lingua
1229	grote egelskop	sparganium erectum
1216	grote watereppe	sium latifolium
943	grove den	pinus sylvestris
254	hoge cyperzegge	carex pseudocyperus
463	holpijp	equisetum fluviatile
7	kalmoes	acorus calamus
640	kikkerbeet	hydrocharis morsus-ranae
1324	klein blaasjeskruid	utricularia minor
1332	kleine valeriaan	valeriana dioica
2343	knolrus	juncus bulbosus
1255	krabbenscheer	stratiotes aloides
929	melkeppe	peucedanum palustre
714	moeraslathyrus	lathyrus palustris
1247	moerasmuur	stellaria uliginosa
427	moerasvaren	thelypteris palustris
783	moeraswederik	lysimachia thyrsoflora
212	moeraszegge	carex acutiformis
939	pilvaren	pilularia globulifera
1323	plat blaasjeskruid	utricularia intermedia
249	pluimzegge	carex paniculata
221	ronde zegge	carex diandra
1362	schildereprijs	veronica scutellata
178	slangenwortel	calla palustris
260	snavelzegge	carex rostrata
237	stijve zegge	carex elata
436	veelstengelige waterbies	eleocharis multicaulis
670	veldrus	juncus acutiflorus
1154	vlottende bies	isolepis fluitans
346	wateraardbei	comarum palustre
821	waterdrieblad	menyanthes trifoliata
326	waterscheerling	cicuta virosa
638	waterviolier	hottonia palustris
849	wilde gagel	myrica gale
866	witte waterlelie	nymphaea alba
844	zompvergeet-mij-nietje	myosotis scorpioides

BIJLAGE V

NATUURDOELTYPEN INGEDEELD NAAR ZOUTPREFERENTIE

AFBEELDING V.1 (ZIE VOLGENDE PAGINA)

LIJST MET NATUURDOELTYPEN MET HUN VOORKOMEN MET GEMETEN ZOUTCONCENTRATIES (BRON: PAULISSEN *ET AL.*, 2007).
TOEGEVOEGD ZIJN CORRESPONDERENDE HABITATTYPEN (NATURA 2000) EN BEHEERTYPEN (NNN) VOLGENS BESCHIKBARE
VERTAALTABELLEN. KLEURDUIDING: LICHTBLAUW IS ZOET, GEEL IS BRAK EN ORANJE IS ZOUT

Code	Naam	Regio	minimum	minimum	optimum	maximum	maximum	aantal vegetatie-	Habitattypen	Natuurbeheertypen
NDT	natuurdoeltype	[Laag Nederland]	[-4 SD]	[-2 SD]	[gemiddelde]	[+2 SD]	[+4 SD]	[opnamen]	Htypen	Ntypen
3.69	Eiken-haagbeukenbos van zandgronden	DU	0	0	69	210	351	552	H9160A	N14.03, N08.02
3.59	Eiken-haagbeukenhakhout en -middenbos van zandgronden	DU	0	0	69	210	352	604		N17.01, N17.02
3.6	Park-stinzenbos	DU,RI,ZK	0	0	70	211	352	66		N03.01
3.67	Bos van bron en beek	[DU]	0	0	70	212	354	555	H91E0, H91E0B	N14.01
3.65	Eiken- en beukenbos van lemige zandgronden	DU,RI	0	0	71	223	375	1664	H9110	N15.02, N16.01
3.66	Bos van voedselrijke,vochtige gronden	DU,RI	0	0	71	216	362	663	H91E0	N14.01
3.57	Elzen-essenhakhout en -middenbos	DU,LV,RI,ZK	0	0	72	217	362	1206		N17.01
3.62	Laagveenbos	LV,RI,ZK	0	0	72	217	362	1038		N16.02, N14.02
3.63	Hoogveenbos	LV	0	0	72	228	383	837	H91D0	N14.02
3.53	Zoom,mantel en droog struweel van het rivieren- en zeekleigebied	AZ,RI,ZK	0	0	77	231	385	855	H5130, H6430C	N14.03, N11.01, N14.01
3.55	Wilgenstruweel	vrijwel alle	0	0	77	231	385	1069		N14.02
3.56	Eikenhakhout en -middenbos	DU,RI	0	0	78	250	421	3044		N17.02
3.28	Veenmosrietland	LV	0	0	79	241	402	371	H7140B	N06.01
3.5	Akker van basenrijke gronden	RI,ZK	0	0	81	230	379	297		N03.01
3.27	Trilveen	LV	0	0	82	228	374	148	H7140A	N06.02
3.43	Natte duinheide	DU	0	0	82	245	408	857	H2140A	N08.04
3.54	Zoom,mantel en droog struweel van de duinen	DU	0	0	82	248	414	1159	H2160	N15.01, N08.02
3.64	Bos van arme zandgronden	DU	0	0	83	263	442	1008	H2180A	N15.01
3.35	Droog kalkrijk duingrasland	DU	0	0	83	240	397	1098	H2130A	N08.02
3.61	Ooibos	AZ,RI,ZK	0	0	84	241	399	186	H91E0_A	N14.01
3.42	Natte heide [moerasheide]	LV	0	0	85	264	444	1387		N06.01, N06.04, N10.01
3.52	Zoom,mantel en droog struweel van de hogere gronden	[LV]	0	0	85	259	433	2172	H5130	N07.01, N14.03
3.46	Droge duinheide	DU	0	0	85	240	394	425	H2140B	N08.04
3.51	Akker van basenarme gronden	RI	0	0	86	241	396	361		N12.05
3.25	Natte strooiselruigte	vrijwel alle	0	0	88	248	408	1117		N12.06
3.29	Nat schraalgrasland	LV,[DU],[RI]	0	0	88	262	435	1338	H6410	N10.01
3.49	Rivierduin en -strand	RI	0	0	89	255	420	383		N11.01
3.1	Droogvallende bron en beek	DU	0	0	91	263	435	500		N03.01
3.39	Bloemrijk grasland van het rivier- en zeekleigebied	RI,ZK	0	0	93	254	415	2597	H6120, H6510A	N12.01, N12.02, N12.03, N11.01
3.34	Droog kalkarm duingrasland	DU	0	0	95	281	468	1057	H2130B	N08.02
3.31	Dotterbloemgrasland van veen en klei	LV,RI,ZK,[AZ],[DU]	0	0	95	258	420	335		N10.01, N10.02
3.17	Geïsoleerde meander en petgat	LV,RI	0	0	95	291	488	1754	H3150	N02.01, N04.01, N04.02
3.21	Zwakgebufferde sloot	[LV]	0	0	95	289	484	541		
3.38	Bloemrijk grasland van het zand- en veengebied	AZ,DU,LV	0	0	97	256	416	1671	H6510A	N12.02, N12.03, N13.01
3.22	Zwakgebufferd ven [zwakgebufferde duinplas]	DU	0	0	97	297	496	896	H3110	N06.05
3.24	Moeras	vrijwel alle,behalve GG	0	0	99	301	502	4320	H2190D	N05.01, N05.02
3.32	Nat,matig voedselrijk grasland	AZ,LV,RI,ZK	0	0	100	268	436	1839		N10.02, N12.02, N12.04, N13.01
3.14	Gebufferde poel en wiel	vrijwel alle	0	0	108	344	581	2077		N02.01, N04.01, N04.02
3.15	Gebufferde sloot	AZ,DU,LV,RI,ZK	0	0	109	346	583	3157		N16.02
3.19	Kanaal en vaart	LV,RI,ZK,[DU]	0	0	120	342	563	3003		N04.02
3.18	Gebufferd meer	AZ,DU,LV,ZK	0	0	125	355	584	2523	H3140	N04.01
3.16	Dynamisch rivierbegeleidend water	RI	0	0	130	352	574	2189		N02.01
3.26	Natte duinvallei	DU	0	0	136	425	714	1154	H2170	N08.03
3.1	Langzaam stromende rivier en nevengeul	RI	0	0	143	349	556	1259		N03.01
3.8	Langzaam stromend riviertje	LV,RI	0	0	147	352	558	1178		N03.01
3.2	Duinplas	DU	0	0	150	437	725	922		N03.01
3.11	Zoet getijdenwater	RI,ZK	0	0	151	358	565	1351		N02.01
3.48	Strand en stuivend duin	DU,[AZ]	0	0	168	603	1038	178	H2120	N08.01
3.13	Brak stilstaand water	AZ,DU,ZK,[LV],[GG]	0	0	241	623	1005	1350		N04.03
3.41	Binnendijks zilt grasland	AZ,ZK	0	1208	5585	9962	14339	1446		N12.04
3.4	Kwelder,slufter en groen strand	DU,GG	0	1217	5917	10617	15317	3315		N03.01
3.12	Brak getijdenwater	GG	13486	13674	13863	14051	14239	40	H1160	N01.01

**TABEL V.1 HERSTELTIJDEN VAN NATUURDOELTYPEN (PAULISSEN *ET AL.*, 2007). GEVOELIGHEID CF BROEKMEYER *ET AL.* (2006):
2 = ZEER GEVOELIG, 1 = GEVOELIG, 0 = ONGEVOELIG EN ? = ONBEKEND. TOTALE GEVOELIGHEID (6 = HOOG, 0 = LAAG)**

NDT	Omschrijving	Gevoeligheid cf Broekmeyer et al. (2006)	Totale gevoeligheid voor verzilting	Hersteltijd (jaren)
3.63	hoogveenbos	2	6	> 25
3.28	veenmosrietland	2	6	3-10
3.34	droog kalkarm duingrasland	2	6	10-25
3.6	langzaam stromende bovenloop	2	6	0-10
3.8	langzaam stromend riviertje	2	6	0-10
3.1	langzaam stromende rivier en nevengeul	2	6	0-10
3.14	gebufferde poel en wiel	2	6	0-10
3.16	dynamisch rivierbegeleidend water	2	6	0-10
3.17	geïsoleerde meander en petgat	2	6	0-50
3.18	gebufferd meer	2	6	0-10
3.42	natte heide (moerasheide)	2	6	0-50
3.43	natte duinheide	2	6	0-10
3.46	droge duinheide	2	6	0-10
3.1	droogvallende bron en beek	?	6	?
3.15	gebufferde sloot	?	6	3-10
3.21	zwakgebufferde sloot	?	6	3-10
3.62	laagveenbos	2	5	>25
3.27	trilveen	2	5	>10
3.29	nat schraalgrasland	2	5	10-50
3.65	eiken- en beukenbos van lemige zandgronden	2	4	>25
3.66	bos van voedselrijke,vochtige gronden	2	4	>25
3.32	nat,matig voedselrijk grasland	2	4	3-50
3.35	droog kalkrijk duingrasland	2	4	10-25
3.39	bloemrijk grasland van het rivier- en zeeleigebied	2	4	3-50
3.24	moeras	2	4	0-50
3.22	zwakgebufferd ven (zwakgebufferde duinplas)	1	4	0-10
3.26	natte duinvallei	2	4	0-10
3.49	rivierduin en -strand	2	4	0-10
3.55	wilgenstruweel	2	4	0-50
3.31	dotterbloemgrasland van veen en klei	?	4	10-50
3.51	akker van basenarme gronden	?	4	3-10
3.57	elzen-essenhakhout en -middenbos	?	4	>50
3.64	bos van arme zandgronden	2	3	>25
3.67	bos van bron en beek	2	3	>25
3.69	eiken-haagbeukenbos van zandgronden	2	3	>25
3.61	ooibos	2	3	10-25
3.54	zoom,mantel en droog struweel van de duinen	2	3	0-10
3.59	eiken-haagbeukenhakhout en -middenbos van zandgronden	?	3	>50
3.6	park-stinzenbos	?	3	>50
3.2	duinplas	?	2	0-10
3.25	natte strooiselruigte	1	2	0-10
3.48	strand en stuivend duin	1	2	0-10
3.52	zoom, mantel en droog struweel van de hogere gronden	1	2	0-50
3.53	zoom, mantel en droog struweel van het rivieren- en zeeleigebied	1	2	0-50
3.11	zoet getijdenwater	?	2	?
3.12	brak getijdenwater	?	2	?
3.13	brak stilstaand water	?	2	3-10
3.19	kanaal en vaart	?	2	?

NDT	Omschrijving	Gevoeligheid cf Broekmeyer et al. (2006)	Totale gevoeligheid voor verzilting	Hersteltijd (jaren)
3.38	bloemrijk grasland van het zand- en veengebied	?	2	10-50
3.41	binnendijks zilt grasland	?	2	10-50
3.56	eikenhakhout en -middenbos	?	2	>50
3.5	akker van basenrijke gronden	?	1	3-10
3.4	kwelder, sluffer en groen strand	0	0	0-10

BIJLAGE VI

**BESCHIKBARE KENNIS EN KENNISLEEMTEN
OVER DE EFFECTEN VAN VERZILTING OP
BODEM EN GEWAS**

TABEL VI.1 BESCHIKBARE KENNIS EN KENNISLEEMTEN OVER DE EFFECTEN VAN VERZILTING OP BODEM EN GEWAS

Auteur	Jaartal	Titel	Reikwijdte	Belangrijkste conclusies	Kennisleemte
pelgrum	1963	gevoeligheid voor verslemping van lichte klei- en zavelgronden	onderzoek gedaan in 1962 in Groningen, maar waarschijnlijk toepasbaar in heel Nederland	informatie over mogelijke verslemping (structuurschade) van een bodem in Nederland	niet getest op effecten van zout
bharbwaj, a.k., rajwar, d., & nagaraja, m.s.	2020	soil fertility problems and management	algemeen en uitgebreid overzicht van de effecten van verzilting op met name de nutriënten beschikbaarheid en opname. Daardoor waarschijnlijk toepasbaar in heel Nederland	verzilting heeft een groot effect op de opname van micro-en macro-nutriënten. Verzilting kan dus ook resulteren in een nutriënten gebrek voor planten, wat weer een goort effect of de groei heeft	niet voor alle grondsoorten is dit gevalideerd, niet gevalideerd in Nederland
ayers, r.s., & westcot, d.w.	1985	Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29		uitgebreid overzicht van de effecten en mogelijkheden van het gebruik van verzilt water voor irrigatie	vaak kennis uit aride gebieden, niet bekend in hoeverre het bruikbaar is in Nederland
minhas en qadir	2024	agroclimate-centric irrigation water quality guidelines	waarschijnlijk een goede eerste richtlijn voor gebruik van (licht) brak water voor irrigatie in Nederland	goede richtlijn voor gebruik van water met verschillende zoutconcentraties, in relatie tot de grondsoort en de zouttolerantie van het gewas	niet gevalideerd in Nederland en publicatie gaat uit van 600 tot 800 mm neerslag, waarvan de auteurs niet zeker weten of dit ook toepasbaar is voor een droge zomer, gevolgd door een nattere periode. Er wordt ook geen onderscheidt gemaakt tussen incidentele irrigatie en intensieve irrigatie
stuyt et al	2011	basic survey zout en joint fact finding effecten van zout. Naar een gedeeld beeld van het zoetwaterbeheer in laag Nederland	heel Nederland	overzicht van de chloride normen binnen diverse waterschappen, grote verschillen tussen waterschappen	
counette	2022	drinkwater voor dieren, van start tot staart	heel Nederland	geeft norm voor zoutgehalte drinkwater vee	
fao & icba	2023	thematic 1: Farmers' guidelines on soil and water management in salt-affected areas	het merendeel is toepasbaar in Nederland	bevat richtlijnen ter attentie van bodem en irrigatie onder zilte omstandigheden	onduidelijk hoe het zit met doorspoeling van verschillende bodemtypen
ayers & westcot	1985	water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29	algemeen en uitgebreid overzicht van bodemmanagement en irrigatie onder zilte omstandigheden		onduidelijk hoe het zit met doorspoeling van verschillende bodemtypen, niet gevalideerd in Nederland
rengasamy & marchuk, 2011	2011	cation ratio of soil structural stability (CROSS)	onderzoek komt uit Australië, dus zeer de vraag in hoeverre dit toepasbaar is in Nederland. Maar de benadering lijkt beter dan de klassieke ESP of SAR bepaling	geeft nieuwe norm voor maat voor bodemstructuur (CROSS)	nog niet gevalideerd in Nederland en dit wordt ook nog niet zo gemeten in Nederland
van bakel en stuyt	2011	actualisering van de kennis van de zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van literatuuronderzoek, expertkennis en praktische ervaringen	heel Nederland		onduidelijkheid over de relatie tussen verzilting en de zoutconcentratie van de wortelzone

Auteur	Jaartal	Titel	Reikwijdte	Belangrijkste conclusies	Kennisleemte
van straten et al.	2019	an improved methodology to evaluate crop salt tolerance from field trials	geldt voor heel Nederland en alle gewassen	dé drempelwaarde van een gewas ter attentie van zouttolerantie bestaat niet. Beste is om van een bandbreedte uit te gaan. Als er toch naar een enkel getal gekeken moet worden, gebruik dan de EC waarde waarbij nog 90 % opbrengst gerealiseerd wordt, dat is betrouwbaarder dan de drempelwaarde	de effecten van zout op een gewas worden mede bepaald door het (lokale) klimaat, de bodemcondities en de gebruikte teeltmethode. Dat is hier niet onderzocht
van straten et al.	2021	estimating cultivar-specific salt tolerance model parameters from multi-annual field tests for identification of salt-tolerant potato cultivars	geldt voor specifieke rassen van aardappel, toepasbaar in heel Nederland		hier is niet gekeken naar verschillende bodemtypen, alleen naar een zandige bodem. Het is aannemelijk dat op zware zavel en klei de negatieve effecten van zout eerder optreedt (ter attentie van effecten op bodemstructuur)
de vos et al	2016	crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on field trials conducted by Salt Farm Texel	heel Nederland	gecontroleerde veldproeven met meerdere zoutconcentraties laat duidelijk zien dat, in vergelijking met de internationale literatuur, de zouttoleranties van diverse gewassen in Nederland vaak hoger uitvallen	van veel gewassen en rassen was maar 1 jaar data beschikbaar en een beperkt aantal gangbare rassen in Nederland getest
van bakel et al	2018	zouttolerantie van gewassen afhankelijk van het groeistadium? Resultaten van een literatuuronderzoek	heel Nederland	de kennis om per gewas de relatie tussen zouttoestand in de wortelzone en de groeireductie per groeistadium is ontoereikend om dit te kwantificeren	de kennis om per gewas de relatie tussen zouttoestand in de wortelzone en de groeireductie per groeistadium is ontoereikend om dit te kwantificeren
stuyt et al	2016	inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen van bestaande gegevens	He heel el Nederland	samenvatting van alle Nederlandse bronnen tot en met 2016 ter attentie van zouttolerantie getest in Nederland	gaat uit van een 40 % betrouwbaarheidsinterval en zelfs dan laat de data een enorme spreiding zien. Verfijning is vereist om een goed handelingsperspectief op te stellen