

Programmaplan

Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer



WENR, Wageningen Environmental Research: Mirjam Hack-ten Broeke, Gerben Bakker, Ralf Verdonschot
Deltares: Ilja America, Joost Delsman, Gualbert Oude Essink
KWR, Water Research Institute: Ruud Bartholomeus, Jeroen Geurts, Klaasjan Raat
Van Geest Ecologie: Gerben van Geest

Januari 2025

Hack-ten Broeke, Mirjam, Gerben Bakker, Ralf Verdonschot, Ilja America, Joost Delsman, Gualbert Oude Essink, Ruud Bartholomeus, Jeroen Geurts, Klaasjan Raat, Gerben van Geest, 2025. *Programmaplan; Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer*.

Dit meerjarig programmaplan "Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer" is opgesteld in opdracht van het ministerie van I&W, het ministerie van LNV en STOWA. Het programmaplan is innovatief en samenhangend van karakter en is gericht op het beantwoorden van fundamentele kennisvragen over verzilting van de wortelzone in samenhang met het grond- en oppervlaktewater, de zouttolerantie van gewassen en die van natuurlijke vegetatie in de Nederlandse context en hoe dit gemodelleerd en gemonitord moet worden. Het programma is onderverdeeld in vier werkpakketten, maar moet in samenhang worden beschouwd om toe te kunnen werken naar handelingsperspectief: Zoutgehalte in het bodemvocht en wortelzone; Zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie; Bruikbaarheid van resultaten; Effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur.

This multi-year program plan, "Dealing with Salinity in Agriculture, Nature, and Water Management," is developed on behalf of the Ministry of I&W, the Ministry of LNV, and STOWA. The program plan is innovative and needs to be addressed in coherence, addressing fundamental knowledge questions about salinization of the root zone in relation to groundwater and surface water, the salt tolerance of crops and natural vegetation in the Dutch context, and how these processes should be modeled and monitored. The program consists of four work packages, but must be considered as an integral program in order to be able to work towards actionable perspectives: Salt content in the soil water and root zone; Salt tolerance of crops and natural vegetation; Usability of results; Effects of salt on soil, (soil) terrestrial nature and aquatic ecosystems.

Trefwoorden: verzilting, wortelzone, zouttolerantie, grondwater, irrigatie

Dit programmaplan is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/685404>.

© 2025 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Foto omslag: <https://kurlandnl.com/product-category/zouten/>

Inhoud

Woord vooraf	4
Samenvatting	5
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 Doelstelling	7
1.3 Aangescherpte onderzoeksvragen	8
1.4 Afbakening	10
2 Van onderzoeksvragen naar plannen van aanpak	12
2.1 Werkpakket 1: aanpak zoutgehalte in het bodemvocht	12
2.2 Werkpakket 2: zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie	18
2.2.1 Werkpakket 2, onderdeel 1: Uit te voeren proeven voor betere kwantificering van de zouttolerantie van landbouwgewassen in Nederland	18
2.2.2 Werkpakket 2, onderdeel 2: Kwantificering van de zouttolerantie van natuurlijke vegetatie in Nederland	24
2.3 Werkpakket 3: Bruikbaarheid van resultaten	27
2.4 Werkpakket 4: effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur: macrofauna, vis en algen (KRW-maatlatten), interactie verzilting – nutriënten etc	29
2.4.1 Effect van zout op bodem voor landbouw en terrestrische natuur	29
2.4.2 Effect van zout op zoete aquatische natuur	30
3 Organisatie, samenwerking, planning, begroting en communicatie	34
3.1 Organisatie en samenwerking	34
3.2 Planning	35
3.3 Begroting	36
3.4 Communicatie	37
4 Mogelijkheden voor financiering	38
Literatuur	40
Bijlage 1 Resultaat informatieronde: Recent en lopend onderzoek, samenwerkingsverbanden en ontwikkelingen	42

Woord vooraf

Voor de totstandkoming van dit programmaplan is er samengewerkt en gecoördineerd vanuit drie kennisinstellingen, namelijk Deltares, KWR Water Research Institute (KWR) en Wageningen Environmental Research (WENR). Het eerste deel van het stappenplan om te komen tot dit programmaplan betrof een consultatie van de opdrachtgevers (ministerie IenW, ministerie LNV en STOWA) om de doelstelling en de verwachtingen te verhelderen en de vraagstelling aan te scherpen. In de tweede stap is zoveel mogelijk informatie opgehaald over lopend en recent afgerond onderzoek. Hiertoe zijn verschillende partijen geraadpleegd. De bevindingen staan in de bijlage van dit programmaplan. Deze informatie-ophaalrondte heeft geleid tot een verdere invulling en aanscherping van de doelstelling en onderzoeksvragen (stap 3). In de volgende paragrafen en hoofdstukken wordt dit verder toegelicht.

Dit programmaplan is opgesteld door onderzoekers van WENR (Gerben Bakker, Ralf Verdonschot, Mirjam Hack-ten Broeke), Deltares (Joost Delsman, Ilja America en Gualbert Oude Essink), KWR (Ruud Bartholomeus, Jeroen Geurts en Klaasjan Raat) en door Gerben van Geest (Van Geest Ecologie). We hebben daarbij hulp gehad van Arjen de Vos (o.a. SALTA), Daniël van de Craats, Martin Mulder, Marius Heinen, Judit Snetlage en Catharien Terwisscha van Scheltinga (WENR), Ayodeji Deolu-Ajayi, Emma Knol en Herman Schoorlemmer (Wageningen Plant Research), Sija Stofberg, Janine de Wit en Edu Dorland (KWR).

We vinden het belangrijk om in het vervolg samen op te trekken met bestaande netwerken en lopende initiatieven zoals SALTA en verschillende praktijk-experimenten, omdat de partijen elkaar kunnen versterken.

Samenvatting

Dit meerjarig programmaplan "Omgaan met zout in landbouw, natuur en waterbeheer" is opgesteld in opdracht van het ministerie van I&W, het ministerie van LNV en de STOWA en is een direct vervolg op het ENZD-advies dat in 2023 is opgesteld. Het programmaplan is innovatief en samenhangend van karakter en is gericht op het beantwoorden van fundamentele kennisvragen over verzilting van de wortelzone in samenhang met het grond- en oppervlaktewater, de zouttolerantie van gewassen en die van natuurlijke vegetatie in de Nederlandse context en hoe dit gemodelleerd en gemonitord moet worden.

Het programmaplan als deze kan niet voor alle jaren in detail worden beschreven. Daarom moet het gezien worden als een concept-plan met een concept-begroting en een concept-planning dat in overleg met alle stakeholders een nadere aanscherping zal krijgen.

'Handelingsperspectief' is een belangrijk streefdoel van het programma. Het kan alleen gegeven worden als de fundamentele vragen die in het ENZD advies zijn omschreven in samenhang worden beschouwd. Dit programmaplan is onderverdeeld in werkpakketten om de fundamentele vragen te kunnen beantwoorden. Dit suggereert ten onrechte dat onderdelen los van elkaar beschouwd kunnen worden. Alle werkpakketten moeten worden uitgevoerd en in samenhang worden beschouwd om een handelingsperspectief te kunnen geven voor actoren in de landbouw, natuurbeheer en waterbeheer. Een belangrijk uitgangspunt in de voorgestelde aanpak is dat kennis van de fysische en plantfysiologische processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer de basis vormen voor afgeleide, meer praktisch toepasbare werkwijzen.

De hoofdvragen van het programmaplan betreffen:

- het zoutgehalte in het bodemvocht en wortelzone en hoe dit tot stand komt.
- de zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie in de Nederlandse context.
- het vertalen van kennis naar het handelingsperspectief: hoe maken we de kennis beschikbaar en toepasbaar?
- effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur: macrofauna, vis en algen (KRW-maatlatten), interactie verzilting –nutriënten etc.

De werkpakketten zijn in hoofdlijnen onderverdeeld in:

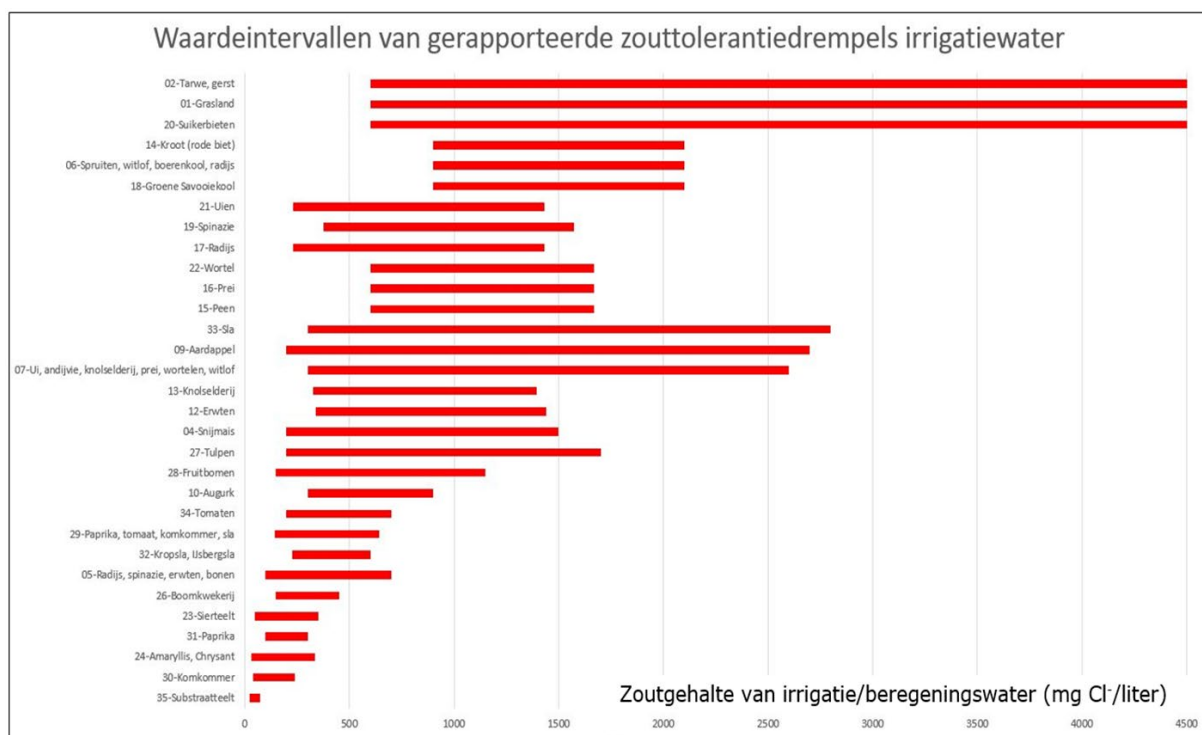
1. Zoutgehalte in het bodemvocht
2. Zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie
 - a. Uit te voeren proeven voor betere kwantificering van de zouttolerantie van landbouwgewassen in Nederland
 - b. Kwantificering van de zouttolerantie van natuurlijke vegetatie in Nederland
3. Bruikbaarheid van resultaten
4. Effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Dit programmaplan is opgesteld omdat een aantal fundamentele vragen de afgelopen jaren steeds onbeantwoord zijn gebleven. Deze vragen hebben betrekking op zouttolerantie van landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie en op het zoutgehalte in het bodemvocht. De kennis over zouttolerantie van gewassen is samengevat door Stuyt e.a. (2016) en Van Bakel e.a. (2018). **Figuur 1** is een overzicht over zouttolerantie-drempelwaarden van irrigatiewater zoals opgesteld door Stuyt e.a. (2016) voor landbouwgewassen, die in het onderschrift vermelden dat de intervallen worden begrensd door de extreme waarden, namelijk de hoogste en de laagste gerapporteerde zouttolerantiedrempel. De intervalbreedte is variabel en veelal kleiner bij kapitaalintensieve teelten, maar in veel gevallen aanzienlijk. Het is duidelijk dat dergelijke intervallen niet te hanteren zijn, bijvoorbeeld niet om vast te stellen welk zoutgehalte gehanteerd kan worden als grenswaarde voor beregening. De intervallen liggen voor een groot deel hoger dan drempelwaarden die nu gehanteerd worden. Wetterskip Fryslân bijvoorbeeld hanteert een waarde van 1200 mg Cl-/l als ultieme waarde voor beregeningswater, terwijl uit **Figuur 1** blijkt dat dit binnen de bandbreedtes valt voor verschillende gewassen.

In deze overzichtsrapporten is ook uitgebreid aandacht besteed aan onderzoek in het buitenland. Hun conclusies zijn steeds geweest: voor de Nederlandse situatie is er onvoldoende bekend over de zouttolerantie van gewassen, al dan niet afhankelijk van het groeistadium, en wat dit betekent voor het waterbeheer en voor de landbouw. De kennisagenda van SALTA (in voorbereiding) borduurt hierop voort evenals het ENZD-advies (Een stap verder met zout in het waterbeheer) en dit programmaplan.



Figuur 1 Grafische weergave, per gewas(groep), van de waardenintervallen van gerapporteerde zouttolerantiedrempels van irrigatiewater voor landbouwgewassen en -gewasgroepen, in neerwaartse richting gerangschikt naar afnemende gemiddelde waarde. De bovengrenzen van de bovenste drie intervallen (tarwe/gerst, grasland en suikerbieten), respectievelijk 10000, 10000 en 5000 mg Cl- /liter, overschrijden de hier gebruikte horizontale schaal. Uit: Stuyt e.a., 2016.

Kennis van zouttolerantie van natuurlijke vegetaties is zeer schaars, omdat we uit ecologische databases alleen kunnen halen wanneer een soort voorkomt in brakke gebieden, maar als deze alleen in zoete condities voorkomt weten we niet of dit te maken heeft met een lagere zouttolerantie of met iets anders. Verder weten we niet of nauwelijks hoe natuurlijke vegetaties reageren op de dynamiek van zoutgehaltes, bijvoorbeeld bij inlaat van brak/zout water in een droge periode ("zoutshock"). Natuurlijke vegetatie kent een grotere genetische en fenotypische diversiteit dan landbouwgewassen en vereist daarom een andere aanpak van experimenteel of veldonderzoek.

Er zijn bovendien veel soorten die mogelijk relevant zijn. Dan gaat het niet alleen om hogere planten, maar vaak ook om mossen, die ontzettend belangrijk kunnen zijn voor ecosystemen. Daarnaast gaat het zowel om terrestrische als aquatische natuur (inclusief vis, macrofauna en algen).

De aard van de (fundamentele) vragen betekent dat langjarig onderzoek nodig is. De problematiek van verzilting en effect van zout op landbouw en natuur is niet een onderwerp waarvoor met één of twee kortlopende onderzoeken de juiste kennis verzameld kan worden. Er zijn verschillende onderzoeken nodig vanuit verschillende disciplines onder verschillende meteorologische, bodemkundige en hydrologische omstandigheden. Daarom is meerjarig onderzoek nodig, zoals ook door het Expertisenetwerk Zoetwater en Droogte (ENZD, 2023) is aangegeven.

De vragen over zouttolerantie van landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie en hoe het zoutgehalte in het bodemvocht tot stand komt zijn onderwerp van dit programmaplan, maar hoe we nieuwe inzichten moeten vertalen naar de waterbeheer- en landbouwpraktijk nadrukkelijk ook. Hoofdstuk 2 bevat een concrete uitwerking van de onderzoeksvragen in plannen voor het uitvoeren van experimenten, maar ook voor dat handelingsperspectief. Tegelijkertijd is die doorvertaling naar de praktijk niet meteen in jaar 1 van het onderzoek aan de orde. Het onderzoek dat we uitvoeren richten we wel in met de bedoeling om praktische informatie op te leveren.

De organisatievorm, begroting en planning, samenwerking met verschillende stakeholders en mogelijke financieringsbronnen komt aan bod in de aparte hoofdstukken 3 en 4.

De voorgestelde aanpak in dit programmaplan is direct gericht op het beantwoorden van de kennisvragen en het vullen van de kennishiaten, zodat de opgedane kennis kan worden vertaald naar gebruikers in het waterbeheer, landbouw en natuur.

1.2 Doelstelling

Klimaatverandering betekent voor Nederland dat we rekening moeten houden met frequenter en langduriger droogte in het voorjaar en de zomer én met zeespiegelstijging. Deze effecten zullen beide leiden tot toename van verzilting van grondwater en oppervlaktewater en vervolgens ook bodemvocht in vooral West- en Noord-Nederland. Door de toename van het neerslagtekort in de zomer zal bovendien de mogelijkheid om zoetwater aan te voeren door de grote rivieren kleiner worden.

Wat dit betekent voor landbouw, natuur en waterbeheer is onvoldoende duidelijk vanwege kennishiaten op het gebied van zouttolerantie van landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie en het gedrag van zout in de wortelzone in relatie tot het bodem-watersysteem en dus ook in relatie tot grondwater, kwel, capillaire opstijging, oppervlaktewater en beregening. Om antwoord te kunnen geven op die specifieke kennisvragen is dit innovatieve programmaplan opgesteld. In de volgende paragraaf scherpen we dus de kennisvragen voor dit onderzoeksprogramma aan, mede op basis van opgehaalde informatie uit recent en lopend onderzoek. Deze vragen worden ook in kaart gebracht door Salta en binnen het project Onderzoeksagenda verzilting & zoute landbouw.

Het programmaplan is gericht op een meerjarig kennisprogramma om antwoord te geven op de lange termijn vragen zoals deze ook al in het ENZD-advies (Een stap verder met zout in het waterbeheer van 7 maart 2023; <https://iplo.nl/thema/water/water-ruimte/expertise-netwerk-zoetwater-droogte/adviezen-expertise-netwerk-zoetwater-droogte/>) zijn aangegeven. Specifiek richten wij ons op verzilting van

bodemvocht in samenspel met grond- en oppervlaktewater, zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie in de Nederlandse context en hoe dit gemodelleerd en gemonitord moet worden.

Uit het ENZD-advies:

"...Zodra zoetwater zout wordt, komt er actie vanuit degene die ermee te maken heeft, bijvoorbeeld agrariërs of natuurbeheerders. En daarna volgt in veel gevallen een actie van de waterbeheerder. De waterbeheerder, zowel op landelijke als regionale schaal, weet in die gevallen vaak niet goed wat de juiste actie is en loopt tegen verschillende vragen aan. Vragen als: hoeveel zoet doorspoelwater is er nodig? Hoe zout is het dan? Hoeveel zout in het (beregenings)water geeft schade? Welke maatregelen kan ik nemen om de schade te beperken? En wegen deze maatregelen op tegen de kosten? Dit soort vragen spelen op lokale, regionale en landelijke schaal en in vele sectoren zoals drinkwater, industrie, landbouw en natuur. En elke vraag is een deel van de puzzel om het zoutvraagstuk een stap verder te krijgen...", "...Binnen de sectoren landbouw en natuur blijven in de onderzoeken en de discussie daarover steeds drie vragen terugkomen die nog niet beantwoord zijn:

1. Hoe zout is het bodemvocht
2. Hoe goed presteren onze huidige modellen in het simuleren van zoutconcentraties in het bodemvocht? Tot op heden kan zoutschade niet meegenomen worden bij het bepalen van de zoetwateropgave en de kosteneffectiviteit van zoetwatermaatregelen. Eén van de redenen hiervoor is onduidelijkheid over wat de huidige modelresultaten waard zijn omdat er een gebrek is aan validatiegegevens wat betreft zoutconcentraties in de wortelzone.
3. Wat is de zouttolerantie van landbouwgewassen, oftewel, wanneer treedt er zoutschade op? Hoewel er veel praktijkproeven in het verleden zijn gedaan, is de kennis die beschikbaar is over wanneer schade optreedt aan landbouwgewassen door zout te diffuus en ontoereikend om op te sturen..."

In aanvulling op het ENZD-advies is de vraag gesteld om aandacht te besteden aan wat op dit moment voor Nederland bekend is over de effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur: macrofauna, vis en algen (KRW-maatlatten). Hieraan wordt in dit document apart aandacht besteed (o.a. hoofdstuk 2.4).

1.3 Aangescherpte onderzoeksvragen

Zoals gezegd richt het programmaplan zich specifiek op verzilting van bodemvocht in samenspel met grond- en oppervlaktewater, zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie in de Nederlandse context en hoe dit gemodelleerd en gemonitord moet worden.

In de bijlage van dit programmaplan is een overzicht gegeven van bestaande kennis en vooral recent en lopend onderzoek. Op basis daarvan zijn de onderzoeksvragen aangescherpt en uitgewerkt in sub-vragen:

Hoofdvraag 1 betreft het zoutgehalte in het bodemvocht en hoe dit tot stand komt.

We willen rond deze hoofdvraag beter begrijpen welke processen de zoutconcentratie van het bodemvocht in de wortelzone bepalen. Binnen deze hoofdvraag onderscheiden we de volgende onderzoeksvragen:

- Welke processen hebben invloed op het zoutgehalte in het bodemvocht in de wortelzone?
 - Wat is de invloed van verschillende bodemtypen en gelaagdheid van de bodem?
 - Wat is de invloed van macroporiën?
 - Wat gebeurt er bij (extreme) uitdroging van de bodem?
- Wat is de invloed van capillaire nalevering van zout water vanuit diepere lagen en zoute kwel vanuit grondwater op het zoutgehalte in de bodem?
- Wat is de invloed van (verschillende typen) beregening met zout water en met zoet water?
- Wat is het effect van drainage, drainagediepte en subirrigatie/onderwaterdrainage?
- Wat is het effect van variërende dichtheid van het water op zoutconcentraties in de wortelzone? Wanneer mag je dichtheidsverschillen verwaarlozen?

- Hoe kwantificeren we zoutgehalte in het bodemvocht?
 - Hoe goed kunnen we aan zout meten?
 - Kunnen we het poriewater meten waaruit een plant water onttrekt?
- Kunnen we deze processen ook modelmatig beschrijven?
 - Met het model SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) voor de onverzadigde zone?
 - Missen we modelconcepten die we moeten toevoegen?
 - Met welke modelconcepten kunnen we verzilting van de wortelzone op perceel- en grotere schaal (regionale modellen, LHM) beschrijven?

Hoofdvraag 2 betreft de zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie in de Nederlandse context.

Binnen deze hoofdvraag onderscheiden we de volgende onderzoeksvragen:

- Hoe kunnen we de zouttolerantie van voor Nederland relevante gewassen beter kwantificeren dan tot nu toe bekend?
- Wat is het effect van dynamiek van het zoutgehalte in het bodemvocht op landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie zoals deze voorkomt in Nederland bij verschillende bodemkundige en hydrologische omstandigheden?
- Hoe reageert het wortelstelsel (worteldiepte, wortelbiomassa, compensatie) van verschillende gewassen op veranderingen van het zoutgehalte?
- Wat is de zouttolerantie van gewassen tijdens verschillende groeistadia van het gewas?
- Is droogte voor gewassen erger dan zout of andersom?
- Wat is het herstelvermogen van landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie, in relatie tot blootstelling en 'uitspoelingstijden'?
- Kunnen we deze processen ook modelmatig beschrijven met gewasgroeimodel WOFOST?

Hoofdvraag 3 betreft het vertalen van kennis naar het handelingsperspectief: hoe maken we de kennis beschikbaar en toepasbaar?

Binnen deze hoofdvraag onderscheiden we de volgende onderzoeksvragen:

- Hoe vertalen we de nieuwe kennis naar hydrologische en gewasgroeimodellen en praktisch toepasbare handvatten?
- Hoe kunnen we de modelresultaten valideren?
- Welke monitoring is daarvoor nodig?
- Kunnen we te hanteren grenzen (of ranges) voor zout in het watersysteem beter onderbouwen?
- Kunnen we met verbeterde modellen komen tot handelingsperspectief en gewenste aanpassingen voor waterbeheer, landbouw en terreinbeheer?
- Hoe kunnen we dit realiseren voor verschillende bodems en hydrologische condities, voor verschillende natuurlijke vegetatietypen, voor gangbare landbouwgewassen en gewasrotaties en voor toekomstige landbouwsystemen?
- Wat is ervoor nodig om de kennis van lab naar veldniveau en naar regionaal niveau te vertalen?
- Welke partijen, tools en middelen zijn nodig om de vertaalslag van kennis naar handelingsperspectief te maken?

Hoofdvraag 4 betreft effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur: macrofauna, vis en algen (KRW-maatlatten), interactie verzilting –nutriënten etc.

Binnen deze hoofdvraag onderscheiden we de volgende onderzoeksvragen:

- Wat zijn de effecten van zout op de bodem zelf en het daarin en daarbij voorkomende bodemleven?
- Wat is de invloed van zout op bodem, zoals bijvoorbeeld op de bodemstructuur en -vruchtbaarheid?
- Welke invloed heeft zout op de bodembiodiversiteit en de bovengrondse biodiversiteit?
- Heeft zout in de wortelzone invloed op nutriëntenbeschikbaarheid en/of effectiviteit van gewasbeschermingsmiddelen?
- Welke invloed heeft zout in het oppervlaktewater op de aquatische natuur en met name macrofauna, vis en algen (KRW-maatlatten)?
- Is goed vast te stellen wanneer of bij welk zoutgehalte in oppervlaktewater soorten verdwijnen?
- Welke dynamiek kunnen ecosystemen aan?

1.4 Afbakening

Een programma zoals dit is niet voor alle komende jaren in detail te beschrijven. Het uitgangspunt is een programma van minimaal 5 jaar, maar de ervaring leert dat het uitvoeren van experimenten bijna altijd tot verbeterwensen en aanpassingen leidt. Door te leren van de experimenten kunnen we de vervolgs-experimenten beter inrichten. We hebben zodoende besloten om een plan en begroting voor het eerste jaar (bij voorkeur 2025) uit te werken en voor de jaren daarna slechts indicatieve plannen en begrotingen op te nemen in dit programmaplan. Ervan uitgaande dat we samenwerking met verschillende partijen aan zullen gaan en ook meerdere financieringsbronnen zullen zoeken is het ook logisch om de plannen verder te ontwikkelen en uit te bouwen in overleg met die verschillende partijen.

Inhoudelijk beperkt zich het voorgestelde onderzoek in eerste instantie (in ieder geval in het eerste jaar) tot zout in de onverzadigde zone, in het ondiepe grondwater en de relatie met beregening en drainage, dus de aangrenzende sloten en de reactie van gewassen op zout in de onverzadigde zone of wortelzone. De relatie met het diepere grondwater en oppervlaktewater komen zodoende later in het programma aan bod.

Nadere keuzes zijn nog nodig over de precieze invulling van de experimenten in jaar 1, zoals welke landbouwgewassen en welke natuurlijke vegetatie prioriteit krijgen en welk type beregening. We stellen voor om in overleg met collega-instellingen en stakeholders een keuze te maken voor de experimenten in het eerste jaar, zoals in hoofdstuk 2 beschreven. Op basis van de resultaten van het eerste jaar van dit onderzoeksprogramma ontwerpen we dan de vervolgs-experimenten en modelleeractiviteiten. Ook de verbinding met veldexperimenten komt dan aan de orde. Om het plan overzichtelijk te houden starten we daarmee op zijn vroegst in jaar 2 van dit programma.

Gedurende het programma zal minstens jaarlijks geëvalueerd worden in hoeverre alle hoofd- en subvragen uit paragraaf 1.3 beantwoord kunnen worden met het onderzoek en of bijstelling nodig is. Het is immers de bedoeling om met dit onderzoeksprogramma op al deze vragen antwoord te geven. In die evaluatie zal worden vastgesteld wat de vorderingen zijn tot dat moment.

Bij een meerjarig programma en bijvoorbeeld de onderzoeksagenda die opgesteld wordt in LVVN-onderzoek 'kennisagenda verzilting' kan ook gedacht worden aan aspecten zoals de landbouwtransitie, welke maatregelen haalbaar zijn om het landgebruik in te richten bij toenemende verzilting en wat daarvan de kosten en baten zijn (zie ook Van den Burg e.a., 2024). Deze aspecten maken geen onderdeel uit van het meerjarenprogramma dat in dit document wordt beschreven, maar het is zeker denkbaar om op termijn de verbinding te zoeken bij het adresseren van deze aanvullende vragen.

We zijn ons bewust van het project 'beslisboom omgaan met zoet-zout dynamiek', uitgevoerd door Witteveen+Bos, Acacia Water, B-WARE, Deltares en The Salt Doctors dat gericht is op effect van verzilting op natuur en landbouw en dat moet resulteren in een afwegingskader voor waterschappen op basis van bestaande kennis. Het programmaplan in dit document kan gaan bijdragen aan verbetering van dat afwegingskader. Dit is niet opgenomen in dit programmaplan.

Welk zout

Als we het over 'zout' hebben dan is niet meteen duidelijk wat we precies bedoelen. In het grondwater en bodemvocht zijn meerdere ionen (opgeloste stoffen) aanwezig. Gebaseerd op de individuele mobiliteiten en geleidbaarheden van deze ionen bepaalt dit de totale elektrische geleidbaarheid (EC; dS m^{-1}) van de oplossing, die eenvoudig is te meten. In relatie tot gewassen kunnen we de wortelwanden zien als semi-permeabele membranen. In dat geval zal het effect van zout op gewas gegeven kunnen worden als een osmotische effect, waarbij wateropname door de wortels beïnvloed wordt door de gradiënt in osmotische potentiaal tussen de binnenkant van de wortel en het bodemvocht. De osmotische potentiaal van het bodemvocht wordt daarbij bepaald door de samenstelling van alle ionen in oplossing. Tenslotte kan er sprake zijn van specifieke ion-effecten op het gewas, zoals een toxisch effect. In de experimenten wordt vaak EC gemeten. Zodra we meer willen weten over het toxische effect van zout is het wel belangrijk om nader onderscheid te maken en is EC onvoldoende. Omdat de problematiek in Nederland vooral is gericht op zeespiegelstijging en verzilting en dus zeezout, beperken we ons vooralsnog tot het meten van Na^+ en Cl^- . In

de toekomst kan het verstandig zijn om ons ook op andere ionen te richten, maar in het eerste jaar in ieder geval niet. Ook mogelijke interactie met andere nutriënten laten we op dit moment nog buiten beschouwing.

Welke modellen

Voor de modellering van water en zout in de onverzadigde zone kiezen we in eerste instantie voor het 1-dimensionale model SWAP en het Maas Hoffman-concept (Maas en Hoffman, 1977). Naast het 'broken-stick' Maas Hoffman-concept is het wellicht mogelijk om het S-vormige Van Genuchten-Hoffman model (van Genuchten en Hoffman, 1984; van Genuchten, 1987) te gebruiken. Van Genuchten en Hoffman (1984) en Van Straten e.a. (2019) hebben beide concepten met elkaar vergeleken en toegepast. Dit zal nader worden verkend. Als we het effect van drainage of de dynamiek van zoetwaterlenzen willen kunnen simuleren kan het belangrijk zijn om over te stappen op 2D-modellering. Mogelijke modellen daarvoor zijn FUSSIM of SUTRA. Dit zal niet in het eerste jaar aan de orde zijn.

Het Maas-Hoffman-concept gaat uit van EC als verklarende variabele. In het van Genuchten-Hoffman concept wordt uitgegaan van de osmotische potentiaal, maar zou in principe ook uit kunnen gaan van de EC. Het van Genuchten-Hoffman concept is in HYDRUS toegepast en daarbij kan gekozen worden om het zouteffect ofwel additief ofwel multiplicatief te combineren met de reductiefunctie voor droogtestress. In SWAP-WOFOST is het ook mogelijk om wateropname via een proces-gebaseerd wateropnameconcept te modelleren. Ook hierin is het mogelijk om het effect van zoutstress op de wateropname rechtstreeks op te nemen in de procesvergelijking zoals voorgesteld door Dalton e.a. (1975) en toegepast door onder andere Heinen (2001) en De Jong van Lier e.a. (2009). Hierbij is nog steeds sprake van ofwel het gebruik van EC ofwel het gebruik van osmotische potentiaal. Volgens Richards (1954) bestaat er een lineair verband tussen deze twee grootheden: osmotische potentiaal is gelijk aan $-360EC$. Dergelijke modelconcepten zijn eenvoudig in SWAP-WOFOST toe te voegen.

Zowel osmotische potentiaal als EC zijn integrale grootheden die worden bepaald door de volledige samenstelling van de bodemoplossing. Het model SWAP-WOFOST heeft weliswaar de mogelijkheid om stoffentransport te simuleren, maar gaat daarbij uit van een enkelvoudig ion. Wanneer SWAP-WOFOST wordt toegepast voor simuleren van zouteffecten gaan we er dus impliciet van uit dat het simuleren van een "tracer-ion" gelijk is aan het transport van alle ionen en daarmee een proxy zal zijn voor de EC.

Hierboven werd verondersteld dat de EC betrekking heeft op het bodemvocht. In de praktijk wordt in bodems vaak de EC in een verzadigingsextract of een specifiek bodem:vocht mengsel (bijv. 1:1.5, 1:2, 1:5; zie bijv. Sonneveld e.a., 1990) gemeten. Daarbij zal de meetwaarde afhangen van de mate waarin het bodemmonster is gemengd met water. Met behulp van TDR kan naast het vochtgehalte van de bodem ook de bulk-EC worden gemeten (Dalton en van Genuchten, 1986; Zegelin e.a., 1989). Deze is afhankelijk van het feitelijke watergehalte. Er bestaan meerdere modelconcepten om deze om te rekenen naar de EC van het bodemvocht (o.a. Mualem en Friedman, 1991).

2 Van onderzoeksvragen naar plannen van aanpak

In dit hoofdstuk vertalen we de onderzoeksvragen uit hoofdstuk 1 naar de aanpak voor het langjarig onderzoek. Dit betreft plannen voor experimenten en voor modelonderzoek en dus ook de uitwerking van laboratorium- en kasexperimenten gericht op bodem en gewas, veldexperimenten, monitoring en modelverbetering. Zoals in de inleiding al aangegeven ligt de nadruk vooralsnog op de plannen voor experimenten in het eerste jaar, omdat we alleen deze in detail kunnen uitwerken. Natuurlijk geven we wel een doorkijk naar langjarig onderzoek.

2.1 Werkpakket 1: aanpak zoutgehalte in het bodemvocht

Bij de uitwerking van de vragen over het **zoutgehalte in het bodemvocht** en hoe dit tot stand komt proberen we alle deelvragen te adresseren en experimenten uit te werken om op termijn op alle deelvragen antwoord te kunnen geven.

Om binnen hoofdvraag 1 over zout in het bodemvocht de processen die invloed hebben op het zoutgehalte in de wortelzone goed te kunnen begrijpen zijn experimenten onder gecontroleerde omstandigheden (kolomexperimenten) en in het veld nodig. Een tussenstap tussen kolommen en veld zijn gecontroleerde experimenten op grotere schaal in mesocosms of het Deltares Geolab. Parallel aan de experimenten onderzoeken we of de optredende processen gesimuleerd kunnen worden met de huidige modelconcepten, of dat er nieuwe concepten nodig zijn. Daarbij fungeert het ééndimensionale SWAP model als primaire kennisdrager van processen die optreden in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer. Voor opschaling naar veldschaal en het kunnen meenemen van de relatie tussen grondwater en onverzadigde zone komen andere modellen in beeld, zoals MODFLOW voor het verzadigde grondwater. Uitgangspunt hierbij is dat we modellen gebruiken die ook in de dagelijkse NL-praktijk worden gebruikt, zodat we vaststellen of concepten hierin toereikend zijn of aanpassing behoeven.

Bij het uitvoeren van de experimenten staat het zo systematisch mogelijk beantwoorden van deelvragen centraal. In onderstaande alinea's worden deze experimenten beschreven.

Lab experimenten

In het lab of in een kas kunnen onder gecontroleerde omstandigheden experimenten worden uitgevoerd die niet worden beïnvloed door het weer en andere omgevingsfactoren. Hierdoor kunnen de complexe processen die invloed hebben op het zoutgehalte in het bodemvocht in de wortelzone zonder verstoring worden geanalyseerd. In het lab voeren we daarom experimenten uit met grondkolommen met verschillende bodemopbouw. Deze kolomexperimenten zijn 1D. In die kolommen kan van onderaf kwel worden opgelegd en kan regen of beregning worden toegediend zoals dat voor het experiment nuttig is. Verdamping simuleren we hetzij via het realiseren van onderdruk bovenaan de kolom, hetzij met een standaard gewas. De kolom is voorzien van meetinstrumenten (rhizons, EC sensoren, TDR) om inzicht te krijgen in de waterbalanstermen, het vochtgehalte en het zoutgehalte.

Met de 1D kolomexperimenten onderzoeken we de volgende vragen:

- Welke processen hebben invloed op het zoutgehalte in het bodemvocht in de wortelzone?
 - Wat is de invloed van verschillende bodemtypen en gelaagdheid van de bodem?
 - Wat is de invloed van macroporiën?
 - Wat gebeurt er bij (extreme) uitdroging van de bodem?
- Wat is de invloed van capillaire nalevering van zout water vanuit diepere lagen en zoute kwel vanuit grondwater op het zoutgehalte in de bodem?
- Wat is de invloed van beregning met zout water en met zoet water?

- Wat is het effect van variërende dichtheid van het water op zoutconcentraties in de wortelzone? Wanneer mag je dichtheidsverschillen verwaarlozen?
- Hoe kwantificeren we zoutgehalte in het bodemvocht?
 - Hoe goed kunnen we aan zout meten?
 - Kunnen we het poriewater meten waaruit een plant water onttrekt?
- Kunnen we deze processen ook modelmatig beschrijven?
 - Met het model SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) voor de onverzadigde zone?
 - Missen we modelconcepten die we moeten toevoegen?

Om deze vragen te beantwoorden voeren we experimenten uit die parallel worden gemodelleerd met SWAP. De modellering dient vooraf om het experiment te ontwerpen en achteraf om te toetsen of het model het experiment goed beschrijft (kloppen parameters, missen we modelconcepten). We stellen voor om de experimenten uit te voeren voor de volgende bodemtypen, die een afwisseling vormen van lithologie / aanwezigheid van macroporiën en gelaagdheid:

Tabel 1 Bodemtypen waarvoor de experimenten worden uitgevoerd

	Bodemtype	Opmerking
1	Zand	Homogeen
2	Zavel	Homogeen
3	Klei, weinig zwel/krimp	Homogeen, weinig macroporiën
4	Klei, veel zwel/krimp	Homogeen, veel macroporiën
5	Veen	Homogeen, macroporiën
6	Gelaagd profiel	Horizontale afwisseling zand / klei
7	Veldprofiel	Gestoken kolom uit representatief perceel

Verder worden de volgende parameters in de experimenten gevarieerd:

Tabel 2 Parameters die worden gevarieerd binnen de experimenten

Parameters	Varianten				
kwel (mm/d)	0	2	5		
Kwelconcentratie (g Cl-/L)	0	1	5	10	15
beregening	geen	Continue regen 1 mm/d	enkele puls 30 mm	verschillende pulsen 30 mm	
Beregenings-concentratie (g Cl-/L)	0	1	5		
verdamping	kale grond, onderdruk	gras			

Voorafgaand aan de experimenten is het eerst nodig om verschillende meettechnieken te analyseren. Is het gebruik van rhizons op verschillende diepten voldoende of zijn er andere bodemvochtsensoren en/of meettechnieken nodig? Te denken valt aan EC-sensoren, (polymeer)tensiometers en vochtsensoren (TDR). Met TDR kan ook EC worden gemeten, maar sensoren moeten goed gekalibreerd worden. Daarnaast toetst dit experiment of water met een tracer (bijvoorbeeld artDNA, of water isotopen) is te labelen, zodat de herkomst van water (kwel, beregening) in de bodem en opgenomen door de plant goed kan worden onderscheiden. De experimenten bestaan uit het creëren van een stabiele situatie, waarna verschillende metingen met elkaar worden vergeleken.

Vervolgens worden de experimenten uitgevoerd waarin de verschillende parameters volgens **Tabel 2** worden gevarieerd. Een aantal hypothesen dienen daarbij als leidraad:

1. Hypothese 1: Als bodem uitdroogt door verdamping a) stroomt brak grondwater capillair omhoog en b) komt tot bij plantenwortels;
Deze hypothese toetsen we in een kolom met aan de onderzijde kweldruk en boven opgelegde langdurige verdamping. We meten hoe hoog kwelwater komt en tot in welke poriëngrootte. Dit doen we in verschillende kolommen voor verschillende grondsoorten en verschillende kweldruk. In samenwerking met onderdeel 2 toetsen we in een experiment of kwelwater daadwerkelijk tot bij de plantenwortels komt (water labelen).
2. Hypothese 2: Indamping kan bij langdurige droogte tot sterk verhoogde poriewaterconcentraties leiden (bij berekening met enigszins brak water, of capillaire toevoer van brak grondwater);
Deze hypothese toetsen we in een kolom met langdurige verdamping, waarbij we het verloop van concentraties en uitdroging over de tijd meten. Dit doen we zowel voor de situatie met kweldruk als met verschillende beregeningsgiften en voor verschillende bodemsoorten.
3. Hypothese 3: Neerslag en kwel mengen slechts heel beperkt in de onverzadigde zone;
Deze hypothese toetsen we door met eenzelfde opzet als experiment 1 kwel en neerslag met tracers te labelen. We onderzoeken hoe het mengingsproces in de onverzadigde zone plaatsvindt voor verschillende grondsoorten, en hoe belangrijk diffusie en dispersie zijn.
4. Hypothese 4: In aanwezigheid van macroporiën gaat neerslag direct naar grondwater, terwijl poriewater verder uitdroogt / indampt zodat zout water niet in de wortelzone terecht komt;
Deze hypothese toetsen we met hetzelfde experimentele opzet als 3, alleen met macroporiën in de bodemkolom.
5. Hypothese 5: Een korte zoutpiek door beregenen met brak water wordt gebufferd door in porievolume aanwezig zoet water;
Deze hypothese toetsen we met een experiment met beregening met in de tijd variërende zoutconcentraties. We meten daarbij het verloop van concentraties in de onverzadigde zone over de tijd.

Na afloop van de experimenten kunnen de bodemkolommen mogelijk gebruikt worden voor het analyseren van veranderingen in bodemchemie (Onderdeel hoofdvraag 4: hoe is bodemchemie veranderd door beregening / kwel brak water?). Een belangrijk punt hierbij is aandacht voor sodiciteit bij kleibodems zodra er gewerkt gaat worden aan de interpretatie van de resultaten.

Geohal experiment

Experimenten in een gecontroleerde goot (**Figuur 2**) kunnen veel inzichten bieden in processen die niet in bodemkolommen gesimuleerd kunnen worden. Denk hierbij aan 2D stromingspatronen van en naar drains. Het is al lang bekend dat er dunne regenwaterlenzen vormen tussen ontwateringssystemen zoals drains en sloten (de Louw e.a. 2011; 2013, Eeman e.a. 2012, Cirkel 2014, Stofberg e.a. 2017, van de Craats e.a. 2024a,b). Numerieke modellen tonen aan dat deze lenzen kunnen verdwijnen in een droge zomer en weer verschijnen in tijden van neerslagoverschot. Voor deze experimenten wordt de goot gecompartmenteerd, in elke compartiment kan een experiment worden uitgevoerd.

Vragen die we beantwoorden met deze experimenten:

- Wat is het effect van drainage en de daarbij horende stromingspatronen op de verplaatsing van zout in het grondwater?
- Hoe varieert het bodemvochtgehalte en zoutconcentratie in bodemvocht tussen en boven drains?
- Op welke wijze speelt dichtheid een rol in het stromingspatroon?
- Vindt er zoutophoping plaats in onverzadigde zone wanneer een regenwaterlens in de zomer deels verdwijnt? Wanneer er zoutophoping plaats vindt: Wat is het effect van zoutuitspoeling op een regenwaterlens?
- Hoe verloopt de zoutconcentratie als het profiel door neerslag weer vernat en regenwaterlens weer gevormd wordt?
- Komt beregeningswater ten goede aan de plant of stroomt snel af naar drainage? Wat is invloed kweldruk / grondwaterstand hierbij?

De experimenten in een goot bieden veel voordelen ten opzichte van veldexperimenten omdat de experimenten gecontroleerd kunnen worden uitgevoerd. Denk hierbij aan bodemopbouw, kwelflux en irrigatie (hoeveelheid/intensiteit). De goot is geschikt om gewassen in mee te nemen. Door de glazen bekisting kunnen de stromingspatronen zichtbaar gemaakt worden wanneer er gewerkt wordt met verschillende kleuren water.

Dit experiment zal hoofdzakelijk dienen ter validatie van numerieke modellen. Het toepassen van één bodemsoort lijkt hierbij voorsnog voldoende. Door te variëren met drainagediepte en afstand kunnen modelconcepten geverifieerd worden. Ook kunnen nieuwe drainageconcepten, zoals dubbele drainage, getest worden. Bij een nadere uitwerking van de experimenten zal rekening gehouden worden met de schaalbaarheid van het systeem. Afhankelijk van de opgelegde randfluxen en drainconfiguratie kan zich wel of geen volledige zoetwaterlens ontwikkelen, wat ook van belang is in de interpretatie van de numerieke resultaten in relatie tot de experimenten en onderzoeksvragen.



Figuur 2 Gecontroleerde goot in Geohal

Veldexperimenten:

Naast lab- en kas-experimenten die onder gecontroleerde omstandigheden de onderliggende processen kunnen simuleren, is het van belang om de hypothesen te testen in veld-setting. Zien we de processen die zich voordoen in het lab ook in veld? Wat is de invloed van gelaagdheid van de bodem en ruimtelijke

heterogeniteit? De experimenten zijn een combinatie van rhizons, peilbuizen, EC sensoren en verschillende (geofysica) sensoren. Verder zijn metingen nodig om de water- en zoutbalans op de percelen zoveel mogelijk sluitend te krijgen, zoals een meteostation, drainageafvoer-metingen, slootmetingen en metingen van het diepere grondwater.

Het is belangrijk om veldonderzoek uit te voeren op meerdere locaties met verschillende kenmerken, zoals:

- Locaties binnen percelen boven drain en tussen drains
- Locaties waar we kwel tot in wortelzone verwachten
- Locatie waar wordt berekend met brak water
- Locaties met veel/weinig heterogeniteit

Dit kan door aan te haken bij lopende projecten zoals VPNA, Dubbele Dijken, Klimaatadaptatie Terschelling, SALTA (Meetnet Praktijklocaties) en projecten die naar alle waarschijnlijkheid volgend jaar gaan lopen (Proefveld Alexanderhoeve Texel, Proefveld Verzilting Academie van Franeker). Het voordeel hierbij is dat we het systeem van deze pilot-gebieden vaak goed kennen, en er waar mogelijk gebruik kan worden gemaakt van bestaande infrastructuur. Een nadeel zijn de omgevingsfactoren die veldexperimenten kunnen beïnvloeden en daarom is het extra van belang om dit veldonderzoek gedurende meerdere jaren uit te voeren. Locaties worden daarom ook niet vastgelegd, maar bij start van het onderzoeksprogramma gezocht op basis van dan lopende projecten / programma's.

Naast het uitvoeren van veldexperimenten pleiten we ervoor dat er langjarige meetreeksen van zout in het grondwater en in de wortelzone worden gestart. Wij zien hier mogelijkheden wanneer samengewerkt kan worden met opleidingsinstituten waarbij studenten, jaarlijks, als onderdeel van een vak metingen uitvoeren. In het verleden zijn op deze manier aanzienlijke datasets verzameld, denk aan de Hupsel.

Modellering

Parallel aan alle experimenten wordt het experiment nagebootst in een numeriek model. Modellering dient hierbij voor procesbegrip, maar met name ook om vast te stellen dat processen die in werkelijkheid optreden ook worden gesimuleerd in de numerieke procesmodellen die functioneren als onze kennisbasis. Voor de 1D kolomexperimenten gebruiken we hiervoor SWAP. Voor de 2D/3D GeoLab en veldexperimenten staat nog niet vast welk modelconcept het beste past. Idealiter passen we een modelconcept toe dat ook in de praktijk (en dus niet alleen in de wetenschappelijke wereld) wordt of gaat worden toegepast. Bijvoorbeeld een koppeling van MODFLOW6 en meerdere SWAP kolommen, of een herverdeling van de drainagefluxen in een 1D kolom in SWAP op basis van het 2D stromingsveld. Het toegepaste modelconcept dient in ieder geval in staat te zijn stroming van zout in zowel de verzadigde als de onverzadigde zone te beschrijven.

Vaststellen van de toe te passen modeltechniek voor 2D en 3D procesbegrip maakt deel uit van het onderzoeksprogramma in een latere fase. Onderzoek naar de toe te passen modeltechniek hoeft hierbij niet te wachten tot de eerste onderzoeksresultaten uit de veldproeven beschikbaar komen. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van eerder promotieonderzoek (zoals van Eeman, Stofberg, Cirkel en van De Louw). De Louw heeft specifiek metingen van zoutconcentratie in zowel de wortelzone / onverzadigde zone als het grondwater verzameld.

Begroting

Kosten Jaar 1: In het eerste jaar worden experimenten uitgevoerd ter voorbereiding en een eerste set echte experimenten, worden de benodigde middelen aangeschaft en een eerste trial gedaan.

Tabel 3 Kosten werkpakket 1: Aanpak zoutgehalte in het bodemvocht, onderdeel Kolom experimenten

Nummer	Onderdeel	Kosten (k€)
1	Vorbereiding: constructie kolommen, detaillering, meetkalibratie	32
2	Materiaal	18
3	Uitvoering experiment	40
4	Lab-analyses	7
5	Modellering experimenten	18
6	Uitwerkingen, rapportage, overleggen, overhead	20
	Totaal	135
	Per volgend experiment	80

Bij de eerste series experimenten is nadrukkelijk sprake van een aanlooffase, waarin de gehanteerde techniek wordt getest, problemen worden opgelost, ervaring wordt opgedaan met het daadwerkelijke meten (welke meetfrequentie is goed genoeg, welke meting geeft het beste resultaat, etc). Deze aanlooffase maakt dat vervollexperimenten goedkoper kunnen worden uitgevoerd. Kosten voor vervolg-kolomexperimenten wordt ingeschat op **80 k€ per experiment-serie**.

Tabel 4 Kosten werkpakket 1: Aanpak zoutgehalte in het bodemvocht, onderdeel Goot experimenten

Nummer	Onderdeel	Kosten (k€)
1	Vorbereiding: klaarmaken goot, detaillering, meetkalibratie	30
2	Huur goot	1
3	Materiaal	18
4	Uitvoering experiment	14
5	Lab-analyses	7
6	Modellering experiment	18
7	Uitwerkingen, rapportage, overleggen, overhead	20
	Totaal	108
	Per volgend experiment	48

Ook de experimenten in de goot kennen een aanlooffase, kosten van vervollexperimenten zijn begroot op **48 k€ per experiment**.

Planning: In kolommen in een lab-opstelling kunnen gedurende langere tijd experimenten worden gedaan. Desgewenst kunnen per jaar meerdere experimenten worden uitgevoerd. Jaar 1 beschouwen we als een initieel jaar waarin de principes worden getest en verfijnd. In de daaropvolgende jaren worden vervollexperimenten uitgevoerd, eventueel aangepast ten opzichte van bovenstaande op basis van eerder opgedane kennis. Parallel aan de experimenten worden ook de modelconcepten getest. Veldexperimenten zijn daarnaast nodig om de bevindingen in praktijk te brengen, stakeholders te betrekken bij het onderzoek en om draagvlak te creëren voor het vervolg. Het is de bedoeling om de veldexperimenten in samenhang met andere lopende of nieuwe initiatieven vorm te geven.

2.2 Werkpakket 2: zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie

De hoofdvraag 'wat is de zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie' wordt in meerdere subvragen beantwoord, omdat zouttolerantie van meerdere factoren afhangt. Die vragen worden allereerst beantwoord door het uitvoeren van intensieve laboratorium en kasproeven, waarbij ongewenste veranderlijke omgevingsfactoren zoveel mogelijk constant worden gehouden. Hierdoor kunnen fundamentele zouttolerante-eigenschappen op een efficiënte en relatief goedkope wijze worden vastgesteld. De resultaten worden kwantitatief beschreven zodat ze in modellen kunnen worden toegepast. In dit voorstel zoeken we naar groeistadium-afhankelijke effecten die later samengevoegd kunnen worden tot een geheel groeiseizoenseffect, zoals die van Maas-Hoffman. Beiden kunnen bruikbaar blijken te zijn en worden getoetst en gevalideerd in praktijksituaties, zoals in veldexperimenten.

Naar prioritering en uitvoerbaarheid gaan we ons richten op het beantwoorden van de volgende vragen en gewenste inzichten:

1. Betere kwantificering van zouttolerantie van in Nederland veel voorkomende landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie, daarbij ook de zoutdynamiek gedurende het groeiseizoen in het bodemvocht in ogenschouw nemend, bij verschillende bodemkundige en hydrologische omstandigheden.
2. Wat zijn de functionele eigenschappen van planten ('plant traits') die maken dat planten goed of minder goed bestand zijn tegen zout en droogte in verschillende groeistadia? Kunnen we de zouttolerantie van verschillende gewassen inschatten op basis van het vóórkomen van deze eigenschappen in een gewas of ras?
3. Hoe kunnen we de effecten van zout op de gewasontwikkeling ook modelmatig beschrijven met SWAP-WOFOST?
4. Hoe reageert het wortelstelsel op (veranderingen van) het zoutgehalte?
5. In welke mate is zouttolerantie afhankelijk van de verdampingsvraag?
6. Wat is het herstelvermogen van landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie?

Hieronder wordt een suggestie geschetst voor de uit te voeren proeven. Dit wordt in een later stadium verder uitgewerkt naar concrete aantallen en situaties.

2.2.1 Werkpakket 2, onderdeel 1: Uit te voeren proeven voor betere kwantificering van de zouttolerantie van landbouwgewassen in Nederland

De voorgestelde proefopzet vraagt een monitoring van de boven- en ondergrondse groei gedurende het gehele groeiseizoen, waarbij 2 situaties (a en b) worden onderscheiden: droogtestress en zoutstress. Een derde item (c) wordt toegevoegd om enig inzicht te krijgen in het eventuele aanpassingsvermogen van de plant in biologische zin, zoals het verhogen van de zoutconcentratie op celniveau. Bij de proeven gaan we in het eerste jaar nadrukkelijk niet uit van gecombineerde droogte- en zoutstress, maar beschouwen ze apart om de verschillende effecten te kunnen onderscheiden:

- a. Groei bij zoet water als functie van toenemende droogte van potentiële groei tot groei bij extreme droogte. De opgelegde droogte geldt voor het gehele groeiseizoen vanaf zaaimoment tot eventuele oogst en wordt binnen die periode niet gevarieerd.
- b. Groei bij verschillende zoutgehalten, maar zonder droogtestress, waarbij de volgende effecten worden onderzocht (Munns e.a., 2015):
 - I. osmotisch effect ('droogte'-effect van zout)
 - II. toxisch effect (bij hoge concentraties en/of wanneer planten het zout niet kunnen filteren in de wortels)

De opgelegde zoutconcentratie geldt voor het gehele groeiseizoen vanaf zaaimoment tot eventuele oogst en wordt binnen die periode niet gevarieerd.

- c. Parallele destructieve experimenten als b. waarbij tijdens verschillende groeistadia de zoutconcentratie in de planten wordt gemeten. Planten met specifieke functionele eigenschappen kunnen zich namelijk aanpassen aan de hoge osmotische situatie door bij hogere zoutconcentraties

in de bodem ook het zoutgehalte in de plant te verhogen (halofyten). Het schijnbare (ervaren) potentiaalverschil tussen bodem en plantcel neemt daarbij af waardoor de plant beter in staat is water op te nemen. De plant kan dit ook doen door suikers in de vacuole te verhogen. Tomaten doen dit en worden juist zoeter onder invloed van zout in de bodem. De keerzijde van het opnemen van zout is dat de plant op een punt kan komen waarin toxiciteit gaat domineren. Behalve zout is het ook nodig om de biomassa van de verschillende plantonderdelen te meten (wortels, bovengronds, vruchten, etc).

Het grootste effect van zout op gewasgroei zoals je dat in Nederland bij landbouwgewassen (en waarschijnlijk ook bij natuurlijke soorten) kan verwachten is het osmotische effect. Als hiervan uitgegaan wordt, dan is het mogelijk om op eenzelfde manier te rekenen aan het osmotische effect als aan droogte. De toxische en osmotische effecten van zout alsook de werkelijke droogte-effecten moeten bij elkaar opgeteld, of met elkaar vermenigvuldigd worden om het totale effect op de plant te kunnen beoordelen. In de experimentele opzet worden de effecten onderscheiden.

Interpretatie 1: Een zoutconcentratie kan worden omgerekend naar een osmotische potentiaal. Als aangenomen wordt dat de osmotische waterpotentiaal gelijk beoordeeld kan worden als de normale waterpotentiaal, kan onderscheid gemaakt worden tussen groeiachterstand door watertekort als gevolg van osmose en als gevolg van toxiciteit. De eventuele onverklaarde extra groeiachterstand naast osmose wordt daarbij toegeschreven aan toxiciteit.

Interpretatie 2: Uit I en II herleiden we drempelwaarden waarbij irrigeren met zout water voor het gewas beter is dan niet irrigeren (verdroging). Dat is het punt waarop groeiachterstand bij verdroging groter is dan de groeiachterstand bij een bepaalde zoutconcentratie.

Interpretatie 3: Uit b herleiden we het effect van de gelijkblijvende zoutconcentratie in de bodem op groeiachterstand tijdens de verschillende groeistadia.

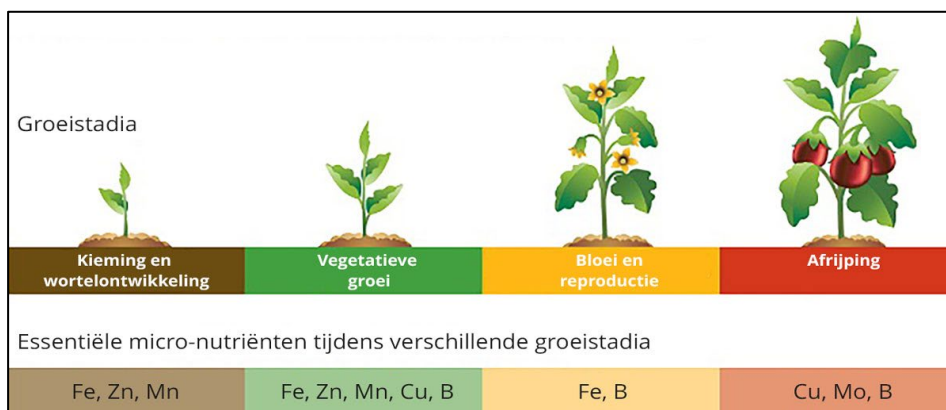
d. Het is complexer om het effect van een wisselende zoutconcentratie gedurende het groeistadium (**Figuur 3**) te onderzoeken, maar zeker niet onmogelijk:

A. proef a. wordt niet herhaald¹ maar uitgebreid:
de plant wordt in een symmetrische proefopzet wisselend blootgesteld aan droogte in 4 delen van het groeiseizoen:

1. zaailing, kieming en wortelontwikkeling
2. vegetatieve groei
3. bloei en reproductie
4. afrijping

Bijvoorbeeld volgens de opzet van **Tabel 5**.

B. Ook proef b. wordt niet herhaald² maar uitgebreid, bijvoorbeeld volgens de opzet van **Tabel 6**.



Figuur 3 Groeistadia van flora (Bron: Plantcoaching.nl)

¹ Een herhaling is feitelijk niet nodig. De vorige proef wordt vervangen door de matrices van **Tabel 5** en **Tabel 6**

² idem

Tabel 5 Proefopzet voor bepaling van effect droogtestress op groei in wisselende groeiseizoenen, per gewas met voldoende nutriënten. Er wordt één grondsoort gebruikt, omdat de droogtestress wordt afgemeten aan de drukhoogte (pF) en niet aan de grondsoort (grondsoortonafhankelijk)

Pot met gewas X	Droogtestress opgelegd* per groeistadium A t/m D, met			
	A	B	C	D
1.2 (ref)	2	2	2	2
2.2 (ref)	2	2	2	2
3.2 (ref)	2	2	2	2
Blok 3 (pF 3):				
1.3	2	2	2	3
2.3	2	2	3	2
3.3	2	2	3	3
4.3	2	3	2	2
6.3	2	3	2	3
7.3	2	3	3	2
8.3	2	3	3	3
9.3	3	2	2	2
10.3	3	2	2	3
11.3	3	2	3	2
11.3	3	2	3	3
13.3	3	3	2	2
14.3	3	3	2	3
15.3	3	3	3	2
16.3	3	3	3	3
Blok 3.5 (pF 3.5):				
1.35	2	2	2	3.5
2.35	2	2	3.5	2
3.35	2	2	3.5	3.5
2.35	2	3.5	2	2
6.35	2	3.5	2	3.5
7.35	2	3.5	3.5	2
8.35	2	3.5	3.5	3.5
9.35	3.5	2	2	2
Etc....				

*) stress wordt opgelegd door al dan geen watergift (met enige vertraging in uiteindelijke drukhoogte). Kolommen moeten niet te groot zijn zodat verdamping snel leidt tot stress. Bij A=4 start de pot met pF=4. Om de proef niet te complex te maken wordt binnen een blok steeds gevarieerd met slechts 1 drukhoogte (bijvoorbeeld alleen pF=2 en pF=3, of alleen pF=2 en pF=4).

Tabel 6 Proefopzet voor bepaling effect zoutstress op groei in wisselende groeistadia, per gewas met voldoende nutriënten $EC_e=N$ dS/m. Er wordt één grondsoort gebruikt, omdat de zoutstress wordt afgemeten aan de zoutconcentratie ($EC\text{-paste}=EC_e$) en niet aan de grondsoort (grondsoort onafhankelijk). De zoutconcentratie in de bodem wordt eveneens gemonitord

Pot met gewas X, $pF=2$ (geen waterstress)	Zoutregime opgelegd per groeistadium A t/m D, met $EC_e = N$ dS/m (zoet water met voldoende nutriënten) en bijvoorbeeld			
	A	B	C	D
1.N (ref)	N	N	N	N
2.N (ref)	N	N	N	N
3.N (ref)	N	N	N	N
Zoutconcentratie 4:				
1.4	N	N	0	4
1.4	N	N	4	N
3.4	N	N	4	4
4.4	N	4	N	N
6.4	N	4	N	4
7.4	N	4	4	N
8.4	N	4	4	4
9.4	4	N	N	N
10.4	4	N	N	4
11.4	4	N	4	N
11.4	4	N	4	4
13.4	4	4	N	N
14.4	4	4	N	4
15.4	4	4	4	N
16.4	4	4	4	4
Zoutconcentratie 12:				
1.12	N	N	N	12
1.12	N	N	12	N
3.12	N	N	12	12
4.12	N	12	N	N
6.12	N	12	N	12
7.12	N	12	12	N
8.12	N	12	12	12
9.12	12	N	N	N
Etc....				

Interpretatie 4: Er kan een uitspraak gedaan worden over de zoutgevoeligheid van gewas X als functie van het groeistadium. Omdat de groei kwantitatief wordt gemonitord kan een kwantitatief model worden afgeleid.

Interpretatie 5: alhoewel de droogtestress nodig is om de osmotische en toxische component te kunnen scheiden en een uitspraak gedaan kan worden over de zoutstress, is er waardevolle kwantitatieve bonus-informatie beschikbaar gekomen om ook de invloed van droogtestress en wortelontwikkeling per groeiseizoen te kunnen beschrijven. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de proefopzet niet voorziet in een vrije wortelontwikkeling in verband met de beperkte potgrootte.

Interpretatie 6: Omdat de proeven van **Tabel 5** worden uitgevoerd, wordt de (potentiële) verdampingsvraag bepaald door de referentiemeting bij $pF=2$ en wordt een invloed van zout op de verdampingsvraag ook beantwoord.

Interpretatie 7: Het herstelvermogen van flora kan deels beantwoord worden door de symmetrische opzet van de proeven. De groeiachterstanden die ontstaan in eerdere groeistadia door zout en herstellen tijdens latere stadia, kunnen worden herkend door de groei te vergelijken met andere regimes. Er kan geen antwoord worden gegeven op meerjarige groei, tenzij de proef in de tijd wordt uitgebreid voor dergelijke vegetatie. Dat wordt in dit project vooralsnog niet gedaan.

Interpretatie 8: de proefopzet maakt het mogelijk om aan te haken bij de veel gebruikte Maas-Hoffman of de Van Genuchten-Hoffman groeireductie-gegevens, waarbij kritische drempelwaardes per groeistadium beschikbaar komen.

Opmerkingen en overwegingen:

1. Er wordt steeds één bodemtype gebruikt: een bodemtype dat niet sterk beïnvloed wordt door zout. Het effect van zout op de zoutconcentratie in verschillende bodemtypen wordt in het vorige onderdeel (werkpakket 1) onderzocht en wordt hier vooralsnog buiten beschouwing gelaten.
2. De proeven worden in kassen uitgevoerd, waarbij omgevingscondities constant gehouden kunnen worden. Omdat de onderrand (bodem) en de vochtcondities erin een belangrijke rol spelen worden de proeven in nauwe samenwerking tussen de disciplines uitgevoerd.
3. Monitoring van de wortelontwikkeling is niet eenvoudig en moet verder worden vormgegeven (wellicht via XRT-metingen, of door transparante potten of rhizotrons te gebruiken). Bedacht moet worden dat een onbelemmerde wortelgroei in kleine potten niet mogelijk is. Uiteraard is dit een interessant gegeven, maar dit kan alleen gemeten worden in grote potten met een opgelegde drukhoogte aan de onderkant. Gerichte experimenten kunnen in een later stadium met beperkte omvang worden opgezet.
4. Op de meeste vragen kan met deze proefopzet per gewassoort antwoord worden gegeven. Elke gewassoort (en ras) vraagt een dergelijke opzet. Er moet daarom goed nagedacht worden over de gewenste soorten die onderzocht gaan worden. Het ligt voor de hand om te starten met de meest voorkomende landbouwgewassen en variëteiten waarbij zouttolerantie relevant is, dus bijvoorbeeld aardappel, tulp en bloemkool of ui, maar niet grasland of suikerbieten. De keuze van de plant wordt gestuurd door de functionele eigenschappen van de plant in relatie tot zoutgevoeligheid. Een belangrijk praktisch keuzeargument is ook de omvang van de plant. Omdat met relatief kleine potten wordt gewerkt moet de plant niet te groot zijn. De proeven zijn gebaseerd op de teelt van een relatief klein gewas met een groeiseizoen van 2 maanden bij potafmetingen van maximaal 20 cm doorsnede en 20 cm hoog. Voor grotere gewassen, of gewassen die een langer groeiseizoen nodig hebben, zijn de kosten hoger dan hieronder aangegeven.

Begroting

Tabel 7 Kosten werkpakket 2.1 Jaar 1: Uit te voeren proeven voor betere kwantificering van de zouttolerantie van landbouwgewassen in Nederland. In het eerste jaar worden experimenten uitgevoerd ter voorbereiding en een eerste set echte experimenten, worden de benodigde middelen aangeschaft en zodoende een eerste trial gedaan.

Nummer	Onderdeel	Kosten k€
1	Vorbereidende werkzaamheden (experimenten, detaillering, kalibraties, bouwen kasopstelling)	31
2	Huur kas (WR)	14
3	Materiaal: potten, cupjes, TDR, tensiometers, zaaigoed, refractometer	41
4	Eerste trial met 1 gewas	36
5	Laboratoriumanalyses Na, Cl, water en gewas	9
6	Modellering: implementatie osmotische potentiaal, groeistadium, kalibratie	17
7	Uitwerkingen, rapportage, overleggen, overhead	21
	Totaal	177

Voor uitbreiding en volgende jaren: de verwachting voor de kosten bedraagt **92 k€ voor elk extra of volgend gewas.**

Het is waarschijnlijk dat tijdens het uitvoeren van de proef inzicht wordt opgedaan over generiek gedrag van planten, waardoor de proefopzet voor vervolggewassen kan verkleinen, of dat andere meettechnieken kunnen helpen bij het versnellen van het proces, bijvoorbeeld door de inzet van QTL-sequencing technieken zoals beschreven door onder andere Kumar, e.a., 2022 en Takagi e.a., 2013. Het is verstandig om dergelijke potentiële aanvullende technieken mee te laten lopen in het onderzoek en hiervoor een percentage van het budget te reserveren. Dit ontbreekt nog in het kostenoverzicht. Los van aanvullende technieken die sneller en goedkoper tot resultaten kunnen leiden, zal elk volgend gewas naar verwachting goedkoper kunnen worden onderzocht in de lijn van bovenstaand matrixonderzoek, omdat ervaring is opgedaan, materialen deels zijn aangeschaft en een snellere meetprocedure gevolgd kan worden, ofwel dat stappen overgeslagen kunnen worden. Ook zullen we verbinding zoeken met andere projecten en experimenten waarbij we kunnen meeliften. Zo is er bijvoorbeeld onderzoek gepland met bodemkolommen waarbij verdichting centraal staat, maar waar wellicht eenvoudig een uitbreiding met zout-experimenten mogelijk is.

Opmerking: De kosten zijn fors, zeker als meerdere gewassen moeten worden onderzocht. Om inzicht te krijgen in de effecten per groeistadium en de relatie met osmotische potentialen en aanvullende effecten, zijn dergelijke proeven toch nodig. Een handelingsperspectief zal waardevoller in te vullen zijn bij een dergelijk uitgebreide benadering omdat per groeiseizoen gestuurd kan worden. Verwacht wordt dat de meeste inzichten verkregen worden tijdens de proeven met de eerste gewassen. Daarna kan wellicht een gefundeerde efficiëntieslag gemaakt worden door proeven sneller of op een andere manier uit te voeren.

Planning: Omdat teelten in een kas minder afhankelijk zijn van de buitencondities, kunnen gedurende langere tijd teelten worden onderzocht. Desgewenst kunnen per jaar meerdere gewassen worden getest: parallel, dan wel sequentieel. Jaar 1 beschouwen we als een initieel jaar waarin de principes worden getest en verfijnd. De daaropvolgende jaren worden vooral gebruikt om het aantal in het lab of kas te testen gewassen uit te breiden. Dit levert de fundamentele kennis op waarnaar we vooral op zoek zijn. Parallel worden in die jaren ook de modelconcepten getest, worden gecombineerde zout-en-droogtestress experimenten opgezet. Veldexperimenten zijn daarnaast nodig om de bevindingen in praktijk te brengen, stakeholders te betrekken bij het onderzoek en om draagvlak te creëren voor het vervolg. Het is de bedoeling om de veldexperimenten in samenhang met andere lopende of nieuwe initiatieven vorm te geven.

2.2.2 Werkpakket 2, onderdeel 2: Kwantificering van de zouttolerantie van natuurlijke vegetatie in Nederland

Om te beginnen is het belangrijk om het verschil met landbouwgewassen te benoemen:

- Het gaat bij natuurlijke vegetatie niet om opbrengst van een vrucht of plantdeel, maar om het duurzaam behouden van verschillende soorten. Dat maakt het lastig om te bepalen welke criteria gehanteerd moeten worden. Bijvoorbeeld: hoe erg is een klein of tijdelijk effect van zout op natuurlijke vegetatie?
- Veel natuurlijke vegetatie is meerjarig terwijl het bij de meeste landbouwgewassen om éénjarige monoteelten gaat;
- Natuurlijke vegetatie komt voor in combinatie met allerlei soorten op een plek;
- Natuurlijke vegetatie is vaak gelimiteerd door nutriënten. Dit betekent dat nutriënt-interacties wellicht mogelijk zijn, maar ook dat er sprake is van concurrentie met andere planten;
- Kennis van zouttolerantie is zeer schaars, omdat we uit ecologische databases alleen kunnen halen wanneer een soort voorkomt in brakke gebieden, maar als deze alleen in zoete condities voorkomt weten we niet of dit te maken heeft met zouttolerantie of met iets anders. Van brakke wateren is bijvoorbeeld wel bekend dat hier minder soorten in voorkomen dan in zoet water of zout water. Om hierover meer te weten is experimenteel werk nodig. Het kan waardevol zijn om voor sommige plantensoorten en vegetaties actief te gaan kijken naar plekken waar af en toe blootstelling is (denk aan de polders met brakke kwel, waarin we weten dat bepaalde zones vaak zout zijn);
- Er is recentelijk wel uitgebreid onderzoek gedaan naar de positieve effecten van verbrakking op natuurlijke vegetaties die vrijwel verdwenen waren door verzoeting in polder Westzaan (Van Dijk e.a., 2024);
- Natuurlijke vegetatie kent een grotere genetische en fenotypische diversiteit dan landbouwgewassen en vereist daarom meer replica's in experimenteel of veldonderzoek;
- Het is lastig om deze soorten te verkrijgen voor experimenteel onderzoek, want ze groeien vaak slecht uit zaad. Stekken kan wel goed werken, maar dit stelt extra eisen aan metingen en voorwerk;
- Er zijn enorm veel soorten die mogelijk relevant zijn. Het gaat niet alleen om hogere planten, maar vaak ook om mossen en dat is weer een heel vak apart. Mossen kunnen echter ontzettend belangrijk zijn voor ecosystemen.

Mogelijkheden voor innovatief experimenteel werk met natuurlijke vegetatie (terrestrisch) en overwegingen:

- De eerste stap is het selecteren van vegetatie in gebieden of zones die mogelijk blootgesteld kunnen worden. Stel dan vast wat voor soort blootstelling verwacht wordt: permanent, tijdelijk (hoe lang dan en onder welke omstandigheden). Het kan een goed idee zijn om het onderzoek naar effect van zout te beperken tot enkele weken in de zomerperiode. Een nadere selectie is nodig van te onderzoeken effecten (zoals: vanaf welk punt minder groei, veranderde bedekking van bepaalde soorten, veranderd fenotype, etc) in relatie tot functionele eigenschappen ('plant traits').
- Kasexperimenten zijn goed te controleren, maar slecht te extrapoleren. Veldexperimenten zijn niet overall toegestaan (in N2000-gebieden waarschijnlijk nergens, slootkantnatuur kan waarschijnlijk wel), maar hebben natuurlijk als risico dat je afhankelijk bent van het weer. Als het een zomer lang regent, meet je sowieso geen effect, dus veldexperimenten moet je alleen doen als het ook mis mag gaan of als het om verwachte langdurige blootstelling gaat, zoals brakke kwel toename. Er zal dan altijd sprake moeten zijn van een meerjarig experiment. Dit kan in buizen of bakken waarmee je een stukje vegetatie en ondergrond los haalt, met instandhouding van de waterbeschikbaarheid. Controlebakken zijn dan ook nodig.
- Een interessante tussenweg zijn mesocosms (proefbakken), waarmee een stukje natuur in een grote bak wordt gebracht voor experimenteel onderzoek. Deze kunnen zowel binnen als buiten worden geplaatst (dus onder meer en minder gecontroleerde omstandigheden) met beide voor- en nadelen. Deze methode richt zich op lage, terrestrische vegetaties. Stofberg et al. (2015) hebben eerder in kasexperimenten gekeken naar het effect van zoutgehalte op de groei van plantensoorten uit verlandingsvegetaties, maar niet naar complete vegetaties. Al bij lage zoutgehaltenes werden (negatieve) effecten waargenomen. Dit correspondeerde echter niet met de natuurlijke verspreiding van deze soort in Nederland. Intacte plaggen met vegetatie zijn daarom waarschijnlijk representatiever om te gebruiken.
- Het voorstel is om verschillende methoden te combineren.

Veldonderzoek

Hiervoor zullen in het eerste jaar verschillende gebieden (met representatieve combinaties van vegetatietype, bodemtype en mate van verzilting) worden bemonsterd waarvan bekend is dat ze recent blootgesteld zijn aan hogere zoutgehalten of een grotere brakwater invloed en/of waar de natuurlijke vegetatie achteruitgaat en een grotere brakwater invloed vermoed wordt. De verwachting is dat hiervoor ongeveer acht gebieden geselecteerd worden. Indien mogelijk worden in elk gebied gradiënten bemonsterd van standplaatsen in een zout- en/of grondwaterstandsgradiënt, bij voorkeur in een droge zomerperiode. In het veld is het vaak moeilijk om het effect van droogte en (toenemende) zoutconcentraties uit elkaar te trekken.

Indien mogelijk wordt in de geselecteerde gebieden gebruik gemaakt van vaste PQ's waarin al langer vegetatieopnamen worden gedaan (en mogelijk ook chemische metingen) en waar ter plekke verzilting is opgetreden of gaat optreden. Deze tijdreeks kan vervolgens verder aangevuld worden door nieuwe vegetatieopnamen te maken. Daarnaast worden zoutgehalten gemeten in de bodem, het bodemvocht, het ondiepe grondwater en de vegetatie. Bovendien kunnen tijdens het veldonderzoek bronlocaties worden gekozen voor het mesocosm onderzoek.

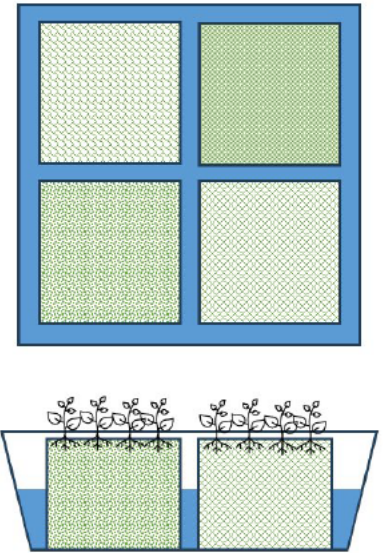
Mesocosms

Mesocosms (proefbakken) kunnen gebruikt worden om te zien hoe plantensoorten en -gemeenschappen het doen in concurrentie met elkaar (**Figuur 4**). Hiervoor worden in het eerste jaar proefbakken aangelegd bij KWR, waarin steeds vier verschillende intacte plaggen met zoutgevoelige vegetaties (incl. bodem) worden geplaatst afkomstig uit één of meerdere gebieden van het veldonderzoek. In de proefbakken kan kunstmatig de grondwaterstand en -kwaliteit worden gemanipuleerd. Op die manier kunnen verschillende behandelingen gerepliceerd worden getest: verschillende zoutconcentraties met een natuurlijke seizoensvariatie (**Tabel 8**). Dit is het meest realistisch en bovendien kan het herstelvermogen van de vegetatie dan beter onderzocht worden. Het effect van de behandelingen zal pas na langere tijd duidelijk worden en dus is het belangrijk dat het experiment meerdere jaren loopt. In eerste instantie wordt het experiment uitgevoerd met voldoende waterbeschikbaarheid, omdat anders een vergelijkbaar experiment nodig is waar zowel naar het effect van zoutgehalte als het effect van droogtestress wordt gekeken. Dit is wel een interessante optie om het experiment mee uit te breiden in een latere fase van het project. In het eerste jaar zal de proefopzet getest en geoptimaliseerd worden (inclusief metingen) en zullen de planten onder dezelfde omstandigheden opgroeien, zodat het experiment in het tweede jaar volledig van start kan gaan.

Tijdens het experiment worden jaarlijks de veranderingen in de soortensamenstelling bepaald. Daarnaast wordt de bovengrondse biomassa aan het eind van het groeiseizoen afgeknipt en gewogen. Vervolgens worden de zoutconcentraties geanalyseerd in de bovengrondse en (indien mogelijk) ondergrondse biomassa. De ontwikkeling van de wortelgroei kan gemonitord worden door wortelscans te maken. De zoutconcentraties in de bodem en/of het bodemvocht/ondiepe grondwater worden maandelijks gemeten en/of continu gevolgd met behulp van EGV sensoren.

Tabel 8 *Behandelingen in het mesocosm experiment, uitgaande van 4 vegetatietypen per mesocosm, 4 behandelingen met fluctuerende zoutconcentraties in het grondwater variërend van licht brak tot zeer brak en 1 controlebehandeling met zoet grondwater. De maximale zoutconcentraties bij elke behandeling zijn vergelijkbaar met de gebruikte zoutregimes bij de landbouwgewassen in Tabel 6 (4, 12, 20 en 28 dS/m). Per behandeling zijn er 5 replica's.*

	Behandeling (fluctuatie in zoutconcentratie in het grondwater)				
	Zoet (< 0,1mg/l)	Licht brak (0,1-1 mg/l)	Zwak brak (1-3 mg/l)	Sterk brak (3-5 mg/l)	Zeer brak (5-7 mg/l)
Vegetatietype 1	5	5	5	5	5
Vegetatietype 2	5	5	5	5	5
Vegetatietype 3	5	5	5	5	5
Vegetatietype 4	5	5	5	5	5



Figuur 4 Rechts: voorbeeld van een mesocosm set-up met een lage natuurlijke vegetatie. Links: boven- en zijaanzicht van het mesocosm experiment. De verschillende vegetatietypen worden steeds in een andere volgorde geplaatst. De behandelingen worden over de mesocosms verdeeld in een randomized block design

Kasexperimenten

Kasexperimenten met een aantal sleutelsoorten die bijvoorbeeld belangrijk zijn als ecosystem engineer, rode lijst-soort en/of interessant zijn in het kader van relateren aan droogtegevoeligheid en trait analyse. Deze zullen eventueel later in het project uitgevoerd worden als aanvulling op de mesocosm experimenten.

Begroting

Tabel 9 Kosten werkpakket 2.2 jaar 1: Kwantificering zouttolerantie van natuurlijke vegetatie in Nederland

Onderdeel	k€
Veldmetingen	
Selectie veldlocaties, veldbezoeken	22.5
Analysekosten (5 monsters per gebied)	22.5
Rapportage	5
	50
Mesocosms	
Ontwerpplan opstellen	4
Aanleg - materialen/directe kosten	30
Aanleg - uren	11
Testen - materialen	2
Testen - uren	7
Verzamelen en installeren kolommen	15
Analysekosten	20
Analyses-uren	2
Data analyse en rapportage	9
	100
Totaal werkpakket 2, onderdeel 2 (jaar 1)	150

Voor uitbreiding en volgende jaren van het mesocosmexperiment: de verwachting voor de kosten bedraagt **75 k€ voor elk volgend onderzoeksjaar** en **75 k€ voor uitbreiding van het mesocosmexperiment**, waarin het effect van zoutgehalte en waterbeschikbaarheid gecombineerd worden.

2.3 Werkpakket 3: Bruikbaarheid van resultaten

Voor het **vertalen van kennis naar het handelingsperspectief** maken we gebruik van de nieuwe gegenereerde inzichten. Immers, het hierboven beschreven onderzoek dat ingaat op de vragen 1 en 2 leveren op processen gebaseerde kennis van de kritische grenswaarden waarbij zout grondwater of irrigatiewater tot een reductie in de gewasgroei leidt. Deze kennis is gevat in het agrohydrologische gewasgroeimodel SWAP-WOFOST, een model dat gericht is op modellering op veldschaal. Om de kennis op verschillende schaalniveaus toe te kunnen passen en ook eenvoudig toepasbaar en beschikbaar voor gebruikers (adviesbureaus, beleidsmakers) te maken zijn nog aanvullende stappen nodig.

Belangrijk uitgangspunt in de voorgestelde aanpak, is dat kennis van de fysische en plantfysiologische processen in de wisselwerking tussen bodem, water, plant en atmosfeer de basis vormen voor afgeleide, meer praktisch toepasbare werkwijzen. Voorbeelden daarvan zijn Waterwijzer Landbouw (WWL) en Waterwijzer Natuur (WWN), waar proceskennis van droogte- en zuurstofstress in detail in SWAP wordt gemodelleerd, maar via zogenaamde metarelaties wordt vertaald naar eenvoudig toepasbare tabellen/functies. De gebruiker hoeft vervolgens niet de detailmodellen te gebruiken. We stellen voor WWN en WWL te gaan uitbreiden / verbeteren met gevoeligheid voor zout.

De hydrologische randvoorwaarden voor SWAP-WOFOST en daaruit afgeleide eenvoudiger toepasbare tools (zoals metarelaties) komen uit regionale kennis (metingen en/of modellen). In tegenstelling tot berekening van droogte- en zuurstofstress betreft dit nu niet alleen gegevens over waterkwantiteit (stijghoogte, oppervlaktewaterpeil), maar ook over waterkwaliteit (zoutconcentratie in het grondwater, kwelflux in de wortelzone, zoutconcentratie in het oppervlaktewater, zoutconcentratie in het beregeningswater). Om zinvolle (regionale) analyses te doen van de effecten van zout water op gewassen en vegetatie, dienen deze hydrologische randvoorwaarden voldoende nauwkeurig te kunnen worden bepaald. Immers, kennis van de randvoorwaarden zijn invoer voor SWAP-WOFOST of daaruit afgeleide metarelaties. Als de invoergegevens of randvoorwaarden niet in orde zijn, dan zijn ook de modelresultaten niet bruikbaar (onzin in = onzin uit). De onderlinge samenhang in het totale bodem-watersysteem moet daarom op orde zijn in de modellen. De interactie tussen grond- en oppervlaktewater zal één van de belangrijke componenten zijn.

Het afleiden van metarelaties voor zout zoals hiervoor bedoeld is nog niet zo eenvoudig. Bijvoorbeeld voor de eerste versie van Waterwijzer Landbouw is er gekozen om alleen rekening te houden met zout in beregeningswater. Een eerste verkenning om ook zoutconcentraties in kwelwater als randvoorwaarde mee te kunnen nemen leverde het inzicht op dat er zo'n 60 miljoen berekeningen nodig zouden zijn om metarelaties af te leiden. Dat is niet realistisch en dus zal er nagedacht moeten worden over alternatieven.

Om tot een bruikbare en toepasbare werkwijze te komen zal bovendien zeker aandacht nodig zijn voor gebruikerswensen. Daarom zal in jaar 1 (2025) overleg worden gepland met waterbeheerders, agrariërs (o.a. NAJK) en terreinbeheerders om de wensen, mogelijkheden en de verwachtingen te bespreken en verhelderen.

De activiteiten in dit werkpakket zijn dus nog vatbaar voor aanpassingen, vooral als gevolg van overleg met gebruikers (vanuit landbouw, natuur en waterbeheer), maar in eerste instantie denken we aan het volgende:

- Meerdere overlegmomenten met verschillende gebruikers
 - Allereerst in jaar 1 (2025) een eerste verkenning van wensen en praktische mogelijkheden;
 - Bij vordering van het project om de bevindingen tot dan toe te bespreken in relatie tot het handelingsperspectief.
- Monitoring en modelleren van zoutconcentraties in het regionale watersysteem

- Dit is nodig om randvoorwaarden voor SWAP-WOFOS-simulaties te bepalen, zo mogelijk gebruik makend van bestaande monitoring;
 - Deze activiteit betreft kennis van zoutconcentraties in oppervlaktewater (en hiermee beregeningswater) en grondwater.
- Vertalen van de output van ruimtelijke hydrologische modellen of meetgegevens naar invoer voor SWAP (voor WWN) en SWAP-WOFOST (voor WWL). De activiteiten daarvoor betreffen vooral:
 - Parametrisatie harmoniseren
 - Modelleren interactie grond- en oppervlaktewater
 - Modelleren van kwel (flux en concentratie) naar de wortelzone, want dit maakt geen deel uit van de regionale modellen
 - We gaan hierbij uit van een mogelijke parallel met de werkwijze in WWN voor berekening van de pH in de wortelzone
- Voor Waterwijzer Landbouw:
 - Werkwijze voor afleiden metarelaties SWAP-WOFOST voor zout met aandacht voor zout in grondwater en zout in beregeningswater
 - Daarbij hoort ook het definiëren van verklarende variabelen zoals:
 - GxGs
 - Zoutconcentratie en flux onderrand SWAP
 - Zoutconcentratie in beregeningswater
 - Klimaat: huidig, 2050 en 2100
 - Hoe metarelaties eruit zouden moeten zien is dus onderdeel van het onderzoek. Het ligt niet voor de hand dat de systematiek te vatten is in eenvoudige tabellen.
- Waterwijzer Natuur: dit instrument berekent op basis van proceskennis de kans op voorkomen van ecotoopgroepen. Veranderingen in standplaatscondities, bijvoorbeeld als gevolg van verandering in klimaat of (water)beheer op vegetatie kunnen zo worden berekend. De effecten van veranderingen in zoutconcentratie maken op dit moment nog geen onderdeel uit van de WWN, maar zijn wel mede bepalend voor het voorkomen van deze ecotoopgroepen. Het kunnen bepalen van zoutcondities in de wortelzone is daarom van groot belang, zo is ook eerder door gebruikers van de WWN aangegeven. De metingen die in eerdere werkpakketten worden uitgevoerd, dienen hiervoor als input. Hiervoor dienen de volgende stappen te worden uitgevoerd:
 - Opstellen database indicatiewaarden voor zout in relatie tot ecotoopgroepen
 - Afleiden en inbouwen metarelaties SWAP voor zout (zie ook WWL)
 - Koppelingen onderliggende modellen klaarmaken
 - Parametrisatie transferfuncties aanpassen
 - Modelverificatie
 - Gevoeligheidsanalyse parameters
- Toetsing berekende opbrengstreducties WWL op basis van:
 - Laboratoriumexperimenten
 - Veldgegevens, waarbij het zeer belangrijk is om gegevens van bodem, grondwaterstanden, zoutconcentraties in oppervlaktewater en/of grondwater en gewasopbrengsten te verzamelen
 - Ervaringen van ondernemers
- Demonstratie in bijvoorbeeld drie verschillende gebieden met aandacht voor:
 - Berekenen van zoutconcentraties in grondwater en oppervlaktewater
 - Irrigatie met brak oppervlaktewater (bijvoorbeeld Noord-Holland en Texel)
 - Invloed van brak grondwater (bijvoorbeeld Zeeland en Waddengebied)
 - Berekenen effect van brak grondwater en brak beregeningswater op de zoutconcentratie in de wortelzone en gewasgroei
 - In beeld brengen effect van brak grondwater op natuurlijke vegetatie.

Werkzaamheden voor Werkpakket 3 starten vooral na het eerste jaar. De begroting hieronder is zodoende indicatief en kan pas later concreet worden gemaakt.

Begroting

Tabel 10 Kosten werkpakket 3: Bruikbaarheid van de resultaten. Indicatie van de kosten voor overleg en inzet voor Waterwijzers

Onderdeel	Kosten k€
Overlegmomenten gebruikers / stakeholders	
Jaar 1	20
Elk daaropvolgend jaar	20
Demo's per jaar (2028-2029)	50
Waterwijzer Landbouw (eerste inschatting)	
Werkwijze metarelaties of alternatief om zoute kwel als randvoorwaarde te kunnen meenemen	100
Opzet monitoring en modellering	50
Koppeling ruimtelijke hydrologie, interacties	40
Parametrisatie, modelruns	60
Toetsing	50
Waterwijzer Natuur (eerste inschatting)	
Opstellen database indicatiewaarden voor zout in relatie tot ecotoopgroepen	20
Afleiden en inbouwen metarelaties SWAP voor zout	40
Koppelingen onderliggende modellen klaarmaken	15
Parametrisatie transferfuncties aanpassen	3
Modelverificatie	7
Gevoeligheidsanalyse parameters	3
Rapportage	5
Kosten jaar 1	20
Totaal werkpakket 3 (afgerond)	580
Monitoring *)	P.M.

*) Monitoring is op dit moment nog niet concreet in te vullen. Het vraagt om een nauwkeurige afstemming met waterbeheerders en agrariërs en wordt daarom hier als post P.M. opgenomen. Met de afstemming en opzet van de monitoring wordt wel al in jaar 1 begonnen.

2.4 Werkpakket 4: effecten van zout op bodem, (bodem)biodiversiteit en aquatische natuur: macrofauna, vis en algen (KRW-maatlatten), interactie verzilting –nutriënten etc

2.4.1 Effect van zout op bodem voor landbouw en terrestrische natuur

Effecten van zout op de bodem zijn met name te verwachten bij bodems met meer dynamische karakteristieken, zoals klei en veen. Voor zand zijn geen nadelige effecten van zout te verwachten op de bodem zelf.

Voor kleibodems is bekend dat een hoge concentratie aan monovalente ionen (zoals Na⁺) ten opzichte van divalente ionen (zoals Ca²⁺ en Mg²⁺) kan resulteren in het uiteenvallen van bodemaggregaten. Deze aggregaten vormen de structuur in de bodem en faciliteren transport van water en zuurstof. Bij hoge

concentraties Na⁺ kunnen de zogenoemde diffuse dubbellagen van de kleiplaatjes dusdanig groot worden dat de aantrekkingskrachten tussen kleiplaatjes niet langer functioneren. Hierdoor kunnen de individuele kleiplaatjes met waterbewegingen getransporteerd worden (dispersie van klei). Dit kan leiden tot het dichtslibben van macro- en microporiën, waardoor de doorlatendheid van de bodem sterk wordt verminderd en er in feite een ondoorlatende laag ontstaat. Dit proces wordt vaak als onomkeerbaar beschouwd, en moet daarom worden voorkomen. Het risico op het voorkomen van dit proces wordt vaak gekarakteriseerd met de SAR (sodium adsorption ratio), ESP (exchangeable sodium percentage) of ESI (electrochemical stability index). Daarnaast is het type klei (minerale samenstelling) en aanwezigheid van organische stof van belang.

Voor veenbodems kan verzilting juist leiden tot een toename in doorlatendheid als gevolg van een toename in porositeit. Daarnaast heeft een veranderende compositie van het bodemvocht ook effecten op de afbraak van veen.

Over het effect van zout op bodembiodiversiteit is bekend dat verzilting over het algemeen effect heeft op het gehele ecosysteem, dus op schimmels, bacteriën, micro- en macrofauna. Een effect daarvan kan zijn dat afbraakprocessen in de bodem, zoals afbraak van organische (mest)stoffen trager gaan verlopen. Voor verschillende soorten wormen en nematoden is zout giftig, maar er bestaan ook zoutminnende soorten die juist gedijen als de bodem zouter wordt. Binnen de kennisagenda van het SALTA cluster komt dit onderwerp ook terug, maar wij zijn niet bekend met de kennisvragen en ook niet met lopend onderzoek over bodembiodiversiteit in relatie tot zout.

2.4.2 Effect van zout op zoete aquatische natuur

Verzilting kan op verschillende manieren stress veroorzaken voor **aquatische levensgemeenschappen** van zoet water. Op dit ogenblik is het nog onbekend welke zoutdynamiek zoete aquatische systemen kunnen verdragen. Ook is nog nauwelijks kennis beschikbaar over de benodigde hersteltijd na een tijdelijke zoutpiek, en zijn er vragen over de gewenste samenstelling van levensgemeenschappen in wateren die kampen met verzilting. Probleem hierbij is dat de effecten van zout op aquatische ecosystemen in Nederlandse wateren niet los gezien kunnen worden van de effecten van verzilting op nutriëntenbeschikbaarheid en vorming van natuurlijke giftige stoffen (zoals sulfiden en ammoniak).

In dit voorstel adresseren we de onderzoeksvragen die centraal staan voor aquatische ecologie, namelijk:

- Op welke manier is verzilting van invloed op de zoete aquatische natuur en met name macrofauna, vis en algen (KRW-maatlatten)? Hierbij gaat het om de (gecombineerde) effecten van zout, nutriënten en sulfiden/ammoniak in verschillende watertypen in laag Nederland;
- Wat is de gewenste soortensamenstelling van verzilte wateren in Nederland, welke doelgemeenschappen zijn realistisch om na te streven?
- Op basis van beantwoording van bovenstaande vragen: welke mate van (periodieke) verzilting kunnen zoete aquatische ecosystemen aan? Waar hangt dit vanaf (wanneer, hoe lang, hoe vaak, omvang van de pieken en dalen)?
- Wat is de hersteltijd van een door zout beïnvloed systeem, wanneer deze is blootgesteld aan een tijdelijke zoutpiek? Van welke factoren is deze hersteltijd afhankelijk?

Onderstaand worden de kennislacunes nader toegelicht. Vervolgens volgt een plan van aanpak en begroting voor 2025 en latere jaren.

Kennislacunes

Verzilting is van grote invloed op zoete aquatische systemen en veroorzaakt op meerdere manieren stress voor de in het water aanwezige levensgemeenschappen. Er zijn echter nog verschillende kennislacunes; hierna zijn de meest belangrijke lacunes weergegeven.

Effecten van fluctuaties in zoutgehalte

De ecologische effecten van 'gemiddelde' zoutgehaltes in brakke wateren zijn redelijk goed bekend. Daarentegen zijn de effecten van periodieke verzilting, waardoor het zoutgehalte in normaal gesproken zoete wateren tijdelijk is verhoogd, nog slecht in beeld gebracht.

Uit de literatuur blijkt dat juist deze fluctuaties van grote invloed zijn op de ecologische kwaliteit. Ter illustratie: veel zoetwaterplanten kunnen zoutgehaltes verdragen tot circa 1500 mg chloride l-1, mits deze gehalten redelijk stabiel zijn in de tijd. Fluctueert het zoutgehalte echter, dan verdwijnen veel van deze soorten al wanneer het zoutgehalte van zoet water plotseling naar 200 - 300 mg chloride l-1 stijgt

De fluctuaties zorgen niet alleen voor grote verschillen in zoutconcentratie in het oppervlaktewater in de tijd (binnen één groeiseizoen en/of opeenvolgende jaren), maar ook voor grote verschillen in zoutgehalte tussen de waterbodem en bovenstaande oppervlaktewater (op hetzelfde ogenblik). De vraag is hoe waterplanten en macrofauna hiermee omgaan; hier is nog nauwelijks onderzoek aan uitgevoerd.

Rol van ontstaansgeschiedenis op effecten

Gebieden met een brakke ontstaansgeschiedenis (zoals een groot deel van West- en Noord-Nederland) en bodems die bestaan uit brakwaterveen (zoals ten noorden van Amsterdam) reageren naar verwachting minder sterk op verzilting dan gebieden met een geheel zoete ontstaansgeschiedenis. De precieze invloed van de historie op de ecologische respons op verzilting (legacy effects) is nog een duidelijke kennislacune.

Verzilting vergroot kans op eutrofiëring, sulfide- en ammoniaktoxiciteit

Verzilting kan leiden tot hogere concentraties van nutriënten en natuurlijke toxische stoffen, zoals sulfiden en ammoniak. Sulfiden zijn voor veel zoetwaterplanten reeds toxisch bij 10 – 100 µmol sulfide l-1 (in poriewater), terwijl in zwak tot matig brakke wateren concentraties van vele honderden tot enkele duizenden µmol l-1 eerder regel dan uitzondering zijn. Ook treedt in wateren met een hoog zoutgehalte sneller toxiciteit op door het ontstaan van ammoniak uit ammonium bij een verhoogde pH. Zowel hoge concentraties sulfide als ammoniak zijn toxisch voor een groot deel van de aquatische fauna, waaronder macrofauna en vissen. Een zoutpiek moet dus altijd in combinatie worden beschouwd met eventuele toxische effecten van andere stoffen. Deze gecombineerde stress op het aquatische ecosysteem is nog niet goed in beeld gebracht voor zoete wateren die verzilten.

Gewenste soortensamenstelling van (periodiek) verzilte zoete wateren in Nederlandse context

Voor (periodiek) verzilte zoete wateren is het nog onduidelijk welk ecologisch streefbeeld moet worden gehanteerd. Natuurlijke brakke wateren worden momenteel als referentie gebruikt voor alle wateren met een verhoogd zoutgehalte. De vraag is of deze vergelijking opgaat voor zoete wateren waarin periodiek zoutpieken optreden. Vanwege de verschillen met de natuurlijke brakke systemen kunnen de verzilte wateren mogelijk beter als 'novel ecosystems' worden opgevat. Op dit ogenblik ontbreekt echter een goede omschrijving van de gewenste soortensamenstelling in deze wateren. Dit geldt met name voor de doelgemeenschappen voor macrofauna. Regionale waterbeheerders plaatsen daarom vraagtekens bij de bruikbaarheid van de huidige KRW-maatlatten voor macrofauna in dit type systemen. Het is daarom nodig een beter beeld te krijgen van de levensgemeenschappen die typisch zijn voor (periodiek) verzilte zoete wateren en deze in de juiste context te plaatsen ten opzichte van zowel de permanent zoete als de volledig brakke wateren.

Wat kan een watersysteem aan? En hiermee samenhangend: wat is de hersteltijd?

Bovengenoemde kennisvragen beogen antwoord te geven op de vraag welke zoutstress zoete aquatische ecosystemen kunnen weerstaan. In dit project brengen we de gevoeligheid van deze systemen in beeld.

Ook de benodigde hersteltijd na een tijdelijke zoutpuls is nog een grote kennislacune. Bij de hersteltijd kan onderscheid gemaakt worden tussen (1) herstel van abiotische condities en (2) herstel van soortensamenstelling van de levensgemeenschap. Voor het eerste punt spelen verschillen in ontstaansgeschiedenis naar verwachting een grote rol (zie hierboven). Voor het herstel van de levensgemeenschap is een belangrijke rol weggelegd voor het omringende landschap: op welke afstand komen bronpopulaties nog voor, en kunnen de soorten uit deze populaties de aangetaste locatie bereiken?

Samenvattend zijn de effecten van verzilting afhankelijk van:

1. eigenschappen van de zoutpuls zelf;
2. eigenschappen van het ontvangende (water)systeem.

Ad. 1. Eigenschappen van de zoutpuls:

- Welke stoffen zijn relevant? Hierbij is niet alleen aandacht voor zout zelf van belang (leidend tot osmotische stress), maar ook voor stoffen die hieraan gelieerd zijn (verandering in nutriëntenbeschikbaarheid (N, P), ammoniak, sulfiden);
- Welke eigenschappen van de puls zijn bepalend? In theorie kan hierbij onderscheid gemaakt worden tussen maximale waarde, tijdstip van blootstelling, blootstellingsduur, herhaalfrequentie en grootte van het beïnvloede gebied.

Ad. 2. Eigenschappen van het systeem:

Verschillen in ontstaansgeschiedenis (mariene versus zoete oorsprong);

Voorstel voor een plan van aanpak

Onderstaand is het plan van aanpak toegelicht. Hierbij zijn de werkzaamheden voor jaar 1 (bij voorkeur 2025) in groter detail uitgewerkt dan die van latere jaren.

A. Correlatief onderzoek aan de hand van velddata (jaar 2025)

In dit onderdeel onderzoeken we het verziltingsvraagstuk vanuit een 'multi-stress' benadering. Verzilting gaat in Nederlandse wateren namelijk niet alleen gepaard met hogere zoutgehalten, maar ook met een verhoogde kans op interne eutrofiëring en sulfide- en ammoniumtoxiciteit. Bovendien liggen veel van deze wateren in intensieve landbouwgebieden met een sterk gestuurd peilbeheer, wat eveneens van grote invloed is op het ecologisch functioneren. De vraag is welke effecten deze factoren op deze watersystemen hebben, en waar mogelijkheden liggen voor handelingsperspectief voor waterbeheerders.

B: Bepaling van ecologische drempelwaarden zoutgehalte (jaar 2025)

De effecten van fluctuaties in het zoutgehalte kunnen onderzocht worden aan de hand van bestaande velddata vanuit Nederland en omliggende landen. Inmiddels vertonen veel wateren in laag Nederland sterke fluctuaties in zoutgehalte in de tijd. Door data te combineren kan (per soort) de respons op fluctuerende zoutgehalten worden afgeleid. De werkhypothese hierbij is dat soorten hogere zoutgehalten kunnen verdragen naarmate de fluctuaties in de tijd kleiner zijn. Deze data kunnen ook gebruikt worden voor een nadere onderbouwing van een gewenste soortensamenstelling voor verzilte wateren (zie onderdeel C).

C: Analyseren ecologische preferenties macrofauna van (periodiek) verzilte zoete wateren (jaar 2025)

In dit project willen we de samenstelling van de levensgemeenschappen en de ecologische preferenties van de bijbehorende soorten in beeld brengen die voorkomen in (periodiek) verzilte zoete wateren en dit vergelijken met de macrofaunasoorten die nu 'goed' scoren volgens de KRW-maatlatten voor brakke wateren. Op deze manier brengen wij in beeld wat de gemeenschappen van verzilte wateren innemen binnen de Nederlandse KRW-watertypologie en wat de gewenste (abiotische) condities zijn voor deze gemeenschappen. Hiermee kunnen we tevens de bruikbaarheid van de huidige KRW-maatlatten evalueren en bekijken of additionele maatlatten of watertypen gewenst zijn.

D: Experimentele veldstudie naar hersteltijd (jaren 2026 t/m 2028)

Er is een grote kennislacune ten aanzien van de hersteltijd van tijdelijke verzilting. Belangrijk hierbij is dat er meerjarig onderzoek plaatsvindt: ecologisch herstel en herkolonisatie kan namelijk verschillende jaren duren, zeker in sterk aangetaste wateren. Voorgesteld wordt om in de jaren 2026 t/m 2028 op een tweetal locaties een experiment in te zetten, namelijk in:

1. een gebied met een zoete ontstaansgeschiedenis (en tot dusver altijd zoet is geweest);
2. een gebied met een brakke ontstaansgeschiedenis (dat naderhand is verzoet).

Bij ecologisch herstel is het van belang dat onderscheid gemaakt wordt tussen:

- Herstel van abiotische condities; hierbij onderscheid in ontstaansgeschiedenis meenemen;
- Herstel van de levensgemeenschap. Dit herstel is mede afhankelijk van het voorkomen van soorten in directe omgeving (regionale soortenpool), in combinatie met de bereikbaarheid van aangetaste locatie voor de betreffende soorten (connectiviteit van het landschap).

Aanvullend op dit veldexperiment kunnen in het laboratorium kolomproeven uitgevoerd worden naar de effecten van verzilting om causale verbanden vast te stellen. Deze kolomproeven zijn bijvoorbeeld van belang voor een risico-inschatting van de gevolgen van verzilting voor eutrofiëring en sulfidevorming.

E. Uitwerken resultaten tot eindrapport (jaar 2029)

In het laatste jaar worden alle resultaten samengevat tot een eindrapport.

Begroting

Tabel 11 Kosten werkpakket 4: Plan van aanpak aquatische natuur

Activiteit	Kosten (k€)	Jaar
A. Correlatief onderzoek bestaande velddata	50	2025
B. Bepaling ecologische drempelwaarden zoutfluctuaties	25	2025
C. Ecologische preferenties macrofauna	20	2025
Veldexperiment hersteltijd en kolomproeven		
Twee locaties veldexperiment en kolomproeven	135	2026
Twee locaties veldexperiment en kolomproeven	135	2027
Twee locaties veldexperiment	120	2028
Samenvattende rapportage	80	2029
Totaal werkpakket jaar 1	95	2025
Totaal werkpakket jaar 2 t/m 5	470	2026 t/m 2029

3 Organisatie, samenwerking, planning, begroting en communicatie

3.1 Organisatie en samenwerking

De vele recente en lopende onderzoeken en initiatieven zoals (deels) opgenomen in bijlage 1 geven wel aan dat er rond de verziltingsproblematiek veel gaande is en veel kennis beschikbaar is. Dit betreft zowel wetenschappelijke kennis als meer praktijkgerichte kennis. Dit programmaplan is er nadrukkelijk op gericht om enkele kennishiaten grondig aan te pakken en hiervoor langjarig onderzoek op te starten met voldoende lange meetreeksen om een grondig fundament neer te zetten voor de beantwoording van de vragen op het gebied van zout in de onverzadigde zone, effect van zout op landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie (zowel terrestrisch als aquatisch) en ten slotte deze kennis te vertalen naar bruikbare handvatten en een handelingsperspectief voor waterbeheer, landbouw en natuur. Contact met stakeholders is daarbij natuurlijk van groot belang en zal zeker vanuit dit programma worden georganiseerd.

Wij stellen voor om de **coördinatie** in handen te houden van de drie onderzoeksinstituten die ook dit plan hebben opgesteld, namelijk Deltares, KWR en WENR. Gezamenlijk overzien wij een groot deel van het kennislandschap voor dit thema.

Daarbij zoeken we voor het onderzoek vanaf het begin, dus al in jaar 1 **samenwerking** met verschillende partijen, in ieder geval:

- Salta cluster als coördinerende netwerkorganisatie, o.a. voor verbinding met lopende initiatieven, onderzoeken en veldexperimenten en ook de link met hogescholen.
- Wageningen Plant Research (zowel Agrosysteemkunde als Open Teelten) voor met name werkpakket 2 en in een later stadium 3.
- Universiteit Utrecht en Wageningen Universiteit vanwege lopend onderzoek, modelontwikkeling en onderzoeksfaciliteiten.
- Van Geest Ecologie voor met name werkpakket 4.

Voor de **uitvoering** van de verschillende werkpakketten gaan we steeds uit van samenwerking. Voor **Werkpakket 1** ligt bij de start het voortouw bij Deltares, maar vergelijkbare en aanvullende experimenten zullen door Deltares en WENR gezamenlijk met andere partijen worden uitgevoerd. Met name voor veldexperimenten is die samenwerking met anderen cruciaal.

Werkpakket 2, onderdeel 1, zal in eerste instantie worden gestart door WENR en WPR (Wageningen Plant Research), vooral waar het proeven betreft onder gecontroleerde omstandigheden. Ook hier geldt dat zeker op termijn voor veldexperimenten samenwerking met andere partijen voor de hand ligt. Onderdeel 2 zal worden geleid vanuit KWR. Welke andere partijen daarbij betrokken zullen worden komt mogelijk later aan bod.

Werkpakket 3 is een samenwerking van WENR, KWR en Deltares in nauwe samenspraak met gebruikers, waarbij voor WWL en WWN het voortouw ligt bij respectievelijk WENR en KWR.

Voor **Werkpakket 4** zijn allereerst WENR en Van Geest Ecologie aan zet. Of andere partijen zullen aansluiten komt later aan de orde.

In overleg met de opdrachtgevers van het meerjarenprogramma zullen we ook een **begeleidingscommissie** samenstellen met in ieder geval vertegenwoordigers van STOWA, ministerie LNV en ministerie IenW. Omdat we vanaf de start in contact willen zijn met de stakeholders lijkt het ons belangrijk om vertegenwoordigers van de waterschappen hierbij uit te nodigen, evenals de landbouwsector en natuurbeheerders.

Het lijkt ons wenselijk om vanaf de start niet alleen universiteiten maar ook hogescholen te betrekken bij het onderzoek en zien bijvoorbeeld genoeg mogelijkheden voor stages of thesis-onderwerpen voor studenten. Ook kan het interessant zijn om verbinding te zoeken met het Delta Climate Center (<https://deltaclimatecenter.nl/>) in Zeeland.

3.2 Planning

Het programmaplan beoogt een langjarig onderzoek om een langjarige meetreeksen op te bouwen. De ervaring leert dat bij het opstarten van experimenten altijd in het eerste meetjaar wordt ontdekt hoe het beter had gemoeten en daarom maken we alleen voor jaar 1 een gedetailleerde planning en begroting, waarbij we na afloop van de experimenten zullen overgaan op een nauwkeuriger planning voor de jaren erna.

Omdat het ook de bedoeling is om snel van start te gaan met het opzetten van aanvullende projecten lijkt het ons verstandig om die ontwikkelingen mee te nemen in de planning. Bijvoorbeeld: als het lukt om een TKI-project te starten vanaf 2026, dan biedt dat concrete uitbreidingsmogelijkheden van alle typen experimenten, modelonderzoek en interpretaties richting de praktijk.

We gaan er voor de planning van uit dat het meerjarenprogramma start in 2025. Dan stellen we voor om in januari of februari een groot startoverleg te organiseren met alle partijen waarmee samenwerking wordt beoogd, uiteraard inclusief de begeleidingscommissie, om tot een gezamenlijke invulling van de plannen te komen. Ook over de nog te maken keuzes voor de experimenten (met welke gewassen en welke proefopzet starten we?), zoals genoemd in hoofdstuk 2, kunnen we dan gezamenlijk een knoop doorhakken.

Grofweg ziet de meerjarenplanning van het voorgestelde programma er dan zo uit:

- In jaar 1 (bij voorkeur 2025):
 - WP 1 en 2: opzet experimenten lab / kas / mesocosms en modelopzet, daarnaast zo mogelijk aansluiting bij veldexperimenten.
 - WP 3: start overleg
 - WP 4: analyses op basis van bestaande data; ecologische drempelwaarden en preferenties bepalen
- Jaar 2-5 (2026 -2029):
 - WP 1 en 2: verbeterde uitvoering experimenten en opschaling ervan naar andere grondsoorten en gewastypen lab / kas / mesocosms / veld, monitoring, modelverbeteringen
 - WP 3: nadere uitwerking methodiek
 - WP 4: start veldexperimenten
- Jaar 3-5 (2027-2029):
 - WP 1, 2 en 4: voortzetting experimenten
 - WP 3: doorvertalen naar handelingsperspectief

Hierbij zijn de aanpalende en aanvullende projecten die we hopen op te zetten niet meegenomen. Pas als meer duidelijkheid bestaat over financiering en budgetten kan ook de planning worden aangescherpt.

Elk jaar zal er gerapporteerd worden over de tussenresultaten en bevindingen die op termijn moeten leiden tot invulling van werkpakket 3 met concrete handvatten, handelingsperspectief, uitwerking van de waterwijzers voor landbouw en natuur en streefconcentraties voor zout in het water, in de bodem en per type landgebruik.

Minimaal jaarlijks zal geëvalueerd worden in hoeverre alle hoofd- en subvragen uit paragraaf 1.3 beantwoord kunnen worden met het onderzoek en of bijstelling nodig is. Het is immers de bedoeling om met dit onderzoeksprogramma op al die subvragen antwoord te geven. In die evaluatie zal worden vastgesteld wat de vorderingen zijn tot dat moment.

Het hangt van de uitvoering en de daadwerkelijke resultaten van de verschillende soorten experimenten af hoe snel bruikbare tussenresultaten kunnen worden opgeleverd. We verwachten bijvoorbeeld concreet binnen enkele jaren uitspraken te kunnen doen voor enkele landbouwgewassen wat het effect van zout in de wortelzone is voor verschillende groeistadia van die gewassen.

3.3 Begroting

In hoofdstuk 2 zijn de kosten voor de verschillende componenten van het programmaplan weergegeven. In **Tabel 12** staat de samenvatting voor jaar 1 en een indicatie voor de jaren erna staat in **Tabel 13**. Deze begroting is zeer indicatief en gaat uit van wat in het voorgaande hoofdstuk is beschreven zonder rekening te houden met de vraag of er überhaupt budget beschikbaar zal zijn.

Tabel 12 Samenvatting kosten jaar 1 (bij voorkeur 2025)

Onderdeel	Kosten (k€)
Werkpakket 1 zoutgehalte in het bodemvocht	
kolomexperimenten	135
gootexperimenten	108
Werkpakket 2, deel 1 zouttolerantie landbouwgewassen	
kasexperimenten	177
Werkpakket 2, deel 2 zouttolerantie natuurlijke vegetatie	
veldmetingen	50
proefvijvers	100
Werkpakket 3	
start overleg	20
Werkpakket 4	
activiteiten jaar 1	95
Projectmanagement (coördinatie, overleg, communicatie, rapportage)	75
Totaal excl. BTW (incl. BTW)	760 (920)

Tabel 13 Samenvatting kosten volgende jaren (indicatief, bijv. 2026-2029)

Onderdeel	Kosten (k€)
Werkpakket 1 zoutgehalte in het bodemvocht	
kolomexperimenten per experiment (minstens 2 per jaar)	160
- gootexperimenten per experiment	48
Werkpakket 2, deel 1 zouttolerantie landbouwgewassen	
-kasexperimenten per experiment (minstens 2 per jaar)	184
Werkpakket 2, deel 2 zouttolerantie natuurlijke vegetatie	
-veldmetingen	75
-proefvijvers	75
Werkpakket 3 handelingsperspectief	
-vanaf jaar 2 jaarlijks bedrag, inclusief modelontwikkeling voor landbouw en natuur (waterwijzers)	145
Werkpakket 4 effecten aquatische natuur	120
Projectmanagement (coördinatie, overleg, communicatie, rapportage)	75
Totaal per jaar excl. BTW, afgerond (incl. BTW)	885 (1,071)

3.4 Communicatie

Zoals al genoemd in paragraaf 3.2 stellen we voor om te beginnen met een projectstart-overleg met alle partijen waarmee samenwerking wordt beoogd, uiteraard inclusief de begeleidings-commissie.

Verder voorzien we een maandelijks projectvoortgang-overleg met de betrokken onderzoekers. De frequentie van het overleg met de begeleidingsgroep van financiers en stakeholders zal eens per kwartaal zijn. In nader overleg kan natuurlijk een andere opzet of frequentie gekozen worden.

Delen van plannen en vooral van resultaten, inzichten en kennis doen we graag via symposia, themamiddagen en webinars. Dit is in 2025 op zijn vroegst aan de orde als de experimenten zijn afgerond, dus in het najaar.

Nadere communicatieplannen kunnen we pas opstellen als we weten hoe en wanneer welke onderdelen van dit plan tot uitvoering zullen komen.

4 Mogelijkheden voor financiering

Een speciaal verzoek van de opdrachtgevers voor het schrijven van dit programmaplan was om aan te geven hoe wij denken dat het onderzoek gefinancierd kan worden. We zien de volgende mogelijkheden:

Basisfinanciering van de ministeries en van STOWA namens de waterschappen: dit is bedoeld voor beleidsondersteuning en ondersteuning van waterbeheer, landbouw en natuur. Tevens is het voor de ministeries en voor STOWA relevant om effecten van klimaatverandering te duiden ten behoeve van opstellen van beleid en waterbeheer. Zeespiegelstijging en verzilting op nationaal en regionaal niveau zijn relevant voor de beleidsterreinen van deze ministeries en zodoende ligt basisfinanciering voor dit meerjarenprogramma voor de hand. Bij de totstandkoming van dit programmaplan waren STOWA en de ministeries LNV en IenW betrokken. Het is echter ook mogelijk dat het ministerie van VRO in de toekomst aansluit vanwege de ruimtelijke vraagstukken die samenhangen met verzilting en omgaan met zout.

Zogenaemde **strategische middelen van de kennisinstellingen** zijn schaars en vaak voor meerdere jaren vastgelegd. Er is een kleine mogelijkheid bij WR om vanuit het kennisbasisbudget een financiële bijdrage voor dit verziltingsonderzoek te verkrijgen. Het thema is aangedragen voor de nieuwe KB-financieringsronde 2025-2028. Wat de kans van slagen is weten we niet, maar het besluit hierover wordt nog wel voor de start van 2025 verwacht. De orde van grootte zou kunnen liggen tussen 50 en 100 k€. Iets dergelijks kan bij Deltares ook worden geprobeerd. Bij KWR is dit niet aan de orde, maar wordt voor dit project wel een eigen bijdrage geleverd via 10% korting op de uurkosten.

Uitbreiding kan mogelijk gerealiseerd worden door aan te sluiten **bij lopende projecten** en initiatieven zoals SALTA als het over veldexperimenten gaat (denk o.a. aan subsidie-aanvraag bij Waddenfonds). Bij bestaande kennisnetwerken zijn meerdere universiteiten, hogescholen, bedrijven, waterschappen en provincies aangesloten. Het is van belang om te verkennen hoe die samenwerking kan bijdragen aan de inhoudelijke invulling en de financiering van het onderzoek.

Een en ander sluit aan op meerdere missies en deelprogramma's van de KIA-LWV, bijvoorbeeld deelprogramma 4 van missie 2C (Weerbare plantaardige productie) en deelprogramma 1 in missie 3C (Toekomstbestendig zoetwatersysteem. Daarom denken we dat het mogelijk moet zijn om binnen de **topsectoren** publiek-private samenwerking op te zetten, waarschijnlijk binnen TKI-Deltatechnologie en TKI-Agri&Food. Daarvoor zijn zowel interesse als middelen nodig van het bedrijfsleven en regionale overheden (waterschappen en provincies). Bij het SALTA cluster zijn verschillende bedrijven aangesloten, dus in samenwerking met SALTA zijn er waarschijnlijk concrete mogelijkheden. Ook is het denkbaar dat banken en verzekeraars interesse hebben in dit thema.

Concreet stellen we voor om in 2025 een langjarig project op te starten met financiering van TKI-Deltatechnologie dat mogelijk halverwege 2025 ook daadwerkelijk kan beginnen. De maximale financiële bijdrage hangt af van de omvang van de cash en in kind bijdragen vanuit bedrijfsleven en andere partijen. Te denken valt aan 100 tot 200 k€ per jaar TKI-budget. Ook kunnen we in 2025 een traject in gang zetten voor financiering vanuit TKI-Agri&Food. Dit kan op zijn vroegst in 2026 van start gaan en hierbij is financiële bijdrage vanuit TKI meestal lager dan bij TKI-Deltatechnologie. De omvang van deze projecten is dus vooralsnog uiterst onzeker.

Voor zeer fundamenteel onderzoek is **NWO** als financier geschikt. Dit is onderzoek dat in principe bij de universiteiten wordt uitgevoerd door PhD-studenten of postdocs. Omdat in dit programmaplan fundamentele vragen aan de orde zijn is het zeker denkbaar om een NWO-aanvraag te laten doen vanuit één van de universitaire groepen die mogelijk zullen aansluiten. Het is hierbij wel belangrijk om te bedenken dat bij PhD-onderzoek op zijn vroegst resultaten beschikbaar komen na 4 jaar onderzoek en dat financiering van NWO onderzoek veelal zeer competitief is.

Het is goed om te beseffen dat bij NWO-onderzoek resultaten onzeker zijn, omdat enerzijds elke PhD-kandidaat een eigen onderzoeksplan moet formuleren en uitvoeren en anderzijds de resultaten vaak lang op zich laten wachten. Het duurt ook vaak lange tijd (tot enkele jaren) voordat een NWO-project is geformuleerd, goedgekeurd en van start kan gaan. De indruk bestaat dat uitvoering van experimenteel werk door PhD-studenten goedkoper is dan de inzet van laboratoriumpersoneel. Dat is een misvatting.

Ten slotte is het ook denkbaar dat er internationale projecten worden opgezet, bijvoorbeeld met EU-financiering. Welke calls daarvoor relevant zijn hebben we nog niet onderzocht, maar zal verder worden verkend met de betreffende afdelingen bij Deltares, WUR en KWR. EU-financiering betekent inpassing van het onderzoek in een breed greep van betrokken landen en ook meerjarige projecten. Dit vraagt creativiteit om de beoogde doelstellingen van onderhavig plan ook daarin deels te kunnen realiseren.

Resumerend

De onderzoeksvragen zijn fundamenteel van karakter en bestrijken meerdere aspecten die niet in één onderzoek kunnen worden beantwoord. Beantwoording van de vragen vereist een goed gecoördineerde en samenhangende aanpak zoals in dit voorstel is aangegeven. Om het onderzoek in samenhang te kunnen uitvoeren zijn uitgebreide laboratorium-, kas-, veld- en modelstudies nodig. Daarmee worden handelingsperspectieven voor boeren, waterbeheerders en terreinbeheerders al gedurende de looptijd van het project duidelijker. Het uitvoeren van slechts enkele onderdelen vertraagt dit proces en de benodigde samenhang gaat ermee makkelijk verloren.

Daarom stellen we voor om op basis van een intentie tot meerjarenfinanciering vanuit de ministeries LVVN, IenW en STOWA het programma te starten. Dit proberen we te ondersteunen met strategische middelen en TKI-middelen. Samenwerking met SALTA is een belangrijke mogelijkheid die verkend wordt. NWO-middelen leveren pas op lange termijn resultaten (over meer dan 5 jaar) en kunnen daarom niet gezien worden als een mogelijke financieringsbron voor de korte termijn binnen dit programma.

We denken met de aangegeven budgetten voor een (minimaal) vijf jaar durend programma een solide basis te kunnen leggen voor fundamenteel begrip van de zoutproblematiek in Nederland en een handelingsperspectief te kunnen opbouwen voor waterbeheer, landbouw en natuur. Voortzetting na vijf jaar zal zeker resulteren in een verder uitbouwen van dit handelingsperspectief, met name op het gebied van het uitbreiden van het aantal gewastypen en natuurtypen waarvoor zouttolerantie wordt onderzocht.

Literatuur

- Cirkel, D. G., Van Beek, C. G. E. M., Witte, J. P. M., & Van der Zee, S. E. A. T. M. (2014). Sulphate reduction and calcite precipitation in relation to internal eutrophication of groundwater fed alkaline fens. *Biogeochemistry*, 117, 375-393.
- De Louw, P. G., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B. R., Gunnink, J., Van Baaren, E. S., & Oude Essink, G. H. P. (2011). Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(12), 3659-3678.
- De Louw, P. G. B., Eeman, S., Oude Essink, G. H. P., Vermue, E., & Post, V. E. A. (2013). Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. *Journal of Hydrology*, 501, 133-145.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.026>
- Dalton F.N., Raats P.A.C., Gardner W.R. 1975. Simultaneous uptake of water and solutes by plant roots, *Agronomy Journal* 67: 334-339.
- Dalton, F.N., M. Th. Van Genuchten. 1986. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma* 38: 237-250.
- De Jong van Lier, Q., J.C. van Dam and K. Metselaar. 2009. Root Water Extraction under Combined Water and Osmotic Stress. *Soil Science Society of America Journal* 73(3): 862-875.
- Delsman, Joost en Ilja America-van den Heuvel, Zoutmodellering in het LHM, Een overzicht van processen en beoordeling van de toepasbaarheid van zoutmodellering voor landelijke beleidsanalyse zoetwater. Deltares.
- Eeman, S., Van der Zee, S. E. A. T. M., Leijnse, A., de Louw, P. G., & Maas, C. (2012). Response to recharge variation of thin rainwater lenses and their mixing zone with underlying saline groundwater. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(10), 3535-3549.
- ENZD, 2023. Een stap verder met zout in het waterbeheer. Expertisenetwerk Zoetwater en Droogte.
<https://iplo.nl/thema/water/water-ruimte/expertise-netwerk-zoetwater-droogte/adviezen-expertise-netwerk-zoetwater-droogte/>
- Heinen, M. 2001. FUSSIM2: brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. *Agronomie* 21: 285-296.
- Kumar, P.; Choudhary, M.; Halder, T.; Prakash, N. R.; Singh, V.; V., V. T.; Sheoran, S.; T., R. K.; Longmei, N.; Rakshit, S.; Siddique, K. H. M., 2022. Salinity Stress Tolerance and Omics Approaches: Revisiting the Progress and Achievements in Major Cereal Crops. *Heredity* 2022, 128 (6), 497-518.
<https://doi.org/10.1038/s41437-022-00516-2>.
- Maas, E.V. en Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance, current assessment. *ASCE J. Irrig. Drain. Div.* 103, 115-134.
- Mualem, Y., S.P. Friedman. 1991. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resources Research* 27: 2771-2777.
- Mulder, H.M., van Bakel, P.J.T., de Vos, A.C., van Straten, G., Heinen, M. en Kroes, J.G. 2018. SWAP-WOFOST toepassing op Zilt Proefbedrijf Texel. STOWA, Rapport 2018-01.
- Munns, R & M. Gilli, 2015. Salinity tolerance of crops – what is the cost? *Crawley, WA, Australia. New Phytologist* (2015) 208: 668-673. doi: 10.1111/nph.13519
- Richards, L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Agricultural Handbook* 60. US Department of Agriculture, Washington, 160 p.
- Stuyt, L. C. P. M., Blom-Zandstra, M. en Kselik, R. A. L. 2016. Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens. Wageningen Environmental Research, Rapport 2739.
- Sonneveld, C., J. van den Ende, S.S. de Bes. 1990. Estimating the chemical compositions of soil solutions by obtaining saturation extracts or specific 1:2 by volume extracts. *Plant and Soil* 122: 169-175
- Stofberg, S. F., Klimkowska, A., Paulissen, M. P. C. P., & Van der Zee, S. E. A. T. M. (2015). Effects of salinity on growth of plant species from terrestrializing fens. *Aquatic Botany*, 121, 83-90.
<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.12.004>

- Stofberg, S. F., Essink, G. H. O., Pauw, P. S., De Louw, P. G., Leijnse, A., & van der Zee, S. E. (2017). Fresh water lens persistence and root zone salinization hazard under temperate climate. *Water Resources Management*, 31, 689-702.
- Takagi, H.; Abe, A.; Yoshida, K.; Kosugi, S.; Natsume, S.; Mitsuoka, C.; Uemura, A.; Utsushi, H.; Tamiru, M.; Takuno, S.; Innan, H.; Cano, L. M.; Kamoun, S.; Terauchi, R., 2013. QTL-Seq: Rapid Mapping of Quantitative Trait Loci in Rice by Whole Genome Resequencing of DNA from Two Bulk Populations. *The Plant Journal* 2013, 74 (1), 174–183. <https://doi.org/10.1111/tpj.12105>
- Van Bakel, P.J.T., M. Blom-Zandstra en L.C.P.M. Stuyt, 2018. Zouttolerantie van gewassen afhankelijke van het groeistadium? Resultaten van een literatuuronderzoek. Wageningen Environmental Research, Rapport 2897.
- Van de Craats, D., van Duijn, C. J., & Raats, P. A. C. (2024a). Interface and mixing zone between soil waters arising from upward and downward seepage-Part I: Homogeneous total density. *Advances in Water Resources*, 192, 104793.
- Van de Craats, D., van Duijn, C. J., & Raats, P. A. C. (2024b). Interface and mixing zone between soil waters arising from upward and downward seepage-Part II: Heterogeneous total density. *Advances in Water Resources*, 193, 104794.
- van den Burg, S., Deolu-Ajayi, A.O., Nauta, R., Cervi, W.R., van der Werf, A., Poelman, M., Wilbers, G.-J., Snethlage, J., van Alphen, M., van der Meer, I.M., 2024. Knowledge gaps on how to adapt crop production under changing saline circumstances in the Netherlands. *Science of The Total Environment* 915, 170118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170118>
- Van Genuchten, M. Th., G.J. Hoffman. 1984. Analysis of crop salt tolerance data. In: I. Shainberg and J. Shalhevet, *Soil Salinity under Irrigation, Processes and Management*, pp. 258-271. *Ecological Studies* 51, Springer-Verlag, Berlin.
- Van Genuchten, M. Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. USDA, ARS, US Salinity Laboratory, Riverside, CA.
- Van Straten, G., De Vos, A. C., Rozema, J., Bruning, B. en van Bodegom, P. M. An improved methodology to evaluate crop salt tolerance from field trials. 2019. *Agricultural Water Management* 375-387.
- Zegelin, S.J., I White, D.R. Jenkins. 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resources Research* 25: 2367-2376.

Bijlage 1 Resultaat informatieronde: Recent en lopend onderzoek, samenwerkingsverbanden en ontwikkelingen

In de zomer van 2024 zijn mede aan de hand van de aangeleverde lijst van projecten (zie onderaan deze bijlage) gesprekken gevoerd met betrokkenen om met hen te praten over de inhoud van de werkzaamheden, de resultaten en de belangrijkste onbeantwoorde vragen. We geven in deze bijlage de belangrijkste bevindingen weer.

Bevindingen

In de meeste projecten gaat het over zoetwatervoorziening, berekening, zoetwaterinfiltratie, peilgestuurde drainage, beheer van zoetwaterlenzen etc., vooral gericht op landbouw (bijvoorbeeld [Spaarwater](http://www.spaarwater.com) www.spaarwater.com, <https://www.stowa.nl/onderwerpen/klimaatadaptatie/zoetwatertekort-droogte/spaarwater>, onderzoek op de Rusthoeve <https://library.kwrwater.nl/publication/70615813/ondergronds-beregenen-op-proefboerderij-rusthoeve-praktijkproef-regelbare-drainage-met-subirrigatie-20202022/>, Schouwen-Duiveland [Drains2Buffer Proef - Projectenportfolio](#), en Walcheren https://waterhouderij.nl/wp-content/uploads/Presentatie_Voortgang_Waterhouderij.pdf en zo zijn er nog veel meer voorbeelden). In verschillende projecten wordt praktijkonderzoek gedaan en/of veldexperimenten en het is voor het meerjarenprogramma belangrijk om daarbij aan te sluiten vanwege de lokale kennis.

In het project FRESHEM (<https://publicwiki.deltares.nl/display/ZOETZOUT/FRESHEM>) worden metingen verricht, maar dan om de zoet-zoutverdeling in de Nederlandse kustregio beter in beeld brengen. De (verticale en horizontale) resolutie is niet zodanig dat ook zoutgehalte in de wortelzone direct in beeld wordt gebracht. In het project Saltisolutions <https://kbase.ncr-web.org/saltisolutions> ligt de focus sterk op hydrodynamica en zouttransport in Rijn-Maasmonding. Een aanknopingspunt binnen Saltisolutions is mogelijk het PhD-onderzoek gericht op zoutstress bij wilgen in uiterwaarden met behulp van biosphere tanks.

In weer andere projecten wordt nagedacht over toekomstige inrichting van verziltende gebieden, zoals in NL2050 of COASTAR (www.coastar.nl) of het gaat om adviezen op basis van bestaande kennis, maar daarbij wordt steeds opnieuw geconstateerd dat er onvoldoende bekend is over zout in de onverzadigde zone en over zouttolerantie van gewassen en natuurlijke vegetatie in Nederlandse (wisselende) omstandigheden. Ook in NWO-programma's zoals Waternex en Aquaconnect komt dit onvoldoende aan de orde.

De concept-kennisagenda van **SALTA** (<https://salta-cluster.com/over-salta/>) bevat dan ook onderzoeksvragen zoals:

- is droogte erger dan zout of andersom?
- is zouttolerantie afhankelijk van het groeistadium van het gewas?
- hoe verloopt de interactie tussen zout in grondwater en in onverzadigde zone
- wat is het herstelvermogen van bodem en plant?
- wat is het effect van type berekening op berekeningsnormen?
- wat is het effect van verschillende bodemtypes en bodemhydrologische condities?

Per provincie worden binnen het Salta-cluster praktijkcoaches aangesteld die gegevens verzamelen in de praktijk. In Friesland en Groningen zijn deze in 2024 gestart. De gegevensverzameling betreft water en bodem (incl. structuurbederf), droogte versus zout, beregenen met zout water, (mogelijkheden voor) gewasherstel en bodemherstel. Bruikbaarheid van dergelijke informatie voor het meerjarenprogramma zal zeker aan de orde moeten komen.

Bijvoorbeeld voor '**Boeren Meten Water**' (<https://boerenmetenwater.nl/>) is door o.a. the Salt Doctors een handelingsperspectief geschreven op basis van bestaande kennis, maar die kennis laat dus voor de

Nederlandse situatie te wensen over. Dit handelingsperspectief gaat vooral in op normen voor beregening, effect van doorspoeling en effect op natuur en landbouw. Veel onderzoek is gedaan in het buitenland onder heel andere klimatologische omstandigheden. Lopend onderzoek is o.a. de **beslisboom omgaan met zoet-zout dynamiek**, uitgevoerd door Witteveen+Bos, Acacia Water, B-WARE, Deltares en The Salt Doctors dat gericht is op effect van verzilting op natuur en landbouw en dat moet resulteren in een afwegingskader voor waterschappen op basis van bestaande kennis. Dat levert dus ook weer vergelijkbare aanbevelingen op voor onderzoek. Het kan voor het meerjarenprogramma een goed aanknopingspunt zijn om op dit afwegingskader voort te borduren.

Bij **SPNA** (Stichting Proefboerderijen Noordelijke Akkerbouw, <https://www.spna.nl/>) wordt onderzoek gedaan onder praktijkomstandigheden waar zowel wordt berekend als ook zoute kwel optreedt, maar tot nu toe heeft dit niet tot nieuwe bruikbare inzichten geleid. Teveel beregening leidt tot een neerwaartse waterflux. Binnen verschillende veldonderzoeken is er wel zout grondwater maar blijft de onverzadigde zone toch zoet en zou er dus geen capillaire nalevering zijn en dat lijkt onwaarschijnlijk. Naast veldexperimenten is daarom onderzoek onder gecontroleerde omstandigheden zeer wenselijk.

Onderzoek bij **Wageningen Plant Research** (WPR-Agrosysteemkunde) heeft zich de laatste jaren vooral gericht op weerbaarheid en adaptatiestrategieën van gewassen tegen zout door toevoegen van bodemverbeteraars of biostimulants <https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/kennisonline-onderzoeksprojecten-lvvv/kennisonline/dealing-with-salinization.htm>. Ook de kosteneffectiviteit van dergelijke strategieën op korte en lange termijn wordt bestudeerd. Er is geen onderzoek geweest naar zouttolerantie van gewassen, zoals in relatie tot de ontwikkelingsfase van gewassen of onder verschillende bodemkundige omstandigheden, terwijl die behoefte wel wordt gevoeld.

Bij WPR-Open Teelten in Lelystad lopen geen projecten rond verzilting, maar wel wordt gewerkt aan een **kennisagenda verzilting** voor het ministerie LNV (nu LVVN), met name gebaseerd op vragen uit de praktijk. Deze kennisagenda zal vooral gericht zijn op middellange en lange termijn, omdat klimaatverandering zal leiden tot steeds vaker droge zomers en zelfs permanente verzilting in steeds meer gebieden. De thematiek tot nu toe betreft vooral het aanpassen van bouwplannen, transitie naar zouttolerante teelten en de aanleg van zoetwaterbuffers. Het is daarbij lastig om droogte- en zoutproblematiek goed te onderscheiden: het gaat immers voor de praktijk over de zoetwatervoorziening in brede zin.

Aan de Wageningen Universiteit (laboratorium voor **Plantenfysiologie**) houdt men zich bezig met de dynamiek van het zoutgehalte en gewaseigenschappen in relatie tot zout, met plantenveredeling, het gebruik van biostimulanten en plantmechanismen. Dat plantenwortels reageren op zout is bekend: wortels groeien weg van zout. Wortels groeien bijvoorbeeld dieper bij beregening met zout water. Dit biedt zeker aanknopingspunten voor het beoogde meerjarenprogramma. Ook bij andere universiteiten zoals RU Groningen en Radboud Universiteit krijgt onderzoek naar verzilting aandacht, veelal gericht op effect van zout op natuur of op plantenfysiologie. Mede via het SALTA-cluster zal het in de toekomst mogelijk zijn om de samenwerking te zoeken.

Binnen de **KIWK** is aandacht besteed aan het ecologisch functioneren van brakke wateren. Kennisvragen omvatten:

- wat zijn huidige concentraties in brakke wateren in ruimte/tijd,
- welke vegetatietypen zijn kenmerkend,
- wat zijn preferenties van soorten en vegetatietypen,
- wat stuurt samenstelling levensgemeenschappen,
- wat zijn drempelwaarden voor nutriënten in brakke wateren?

De overblijvende kennislacunes zijn vervolgens geïdentificeerd:

- Over waterplanten is redelijk kennis, macrofauna niet. Over algen, zoöplankton en vis bestaan weinig tot geen gegevens;
- Op dit ogenblik ontbreekt een goed referentiebeeld voor verschillende typen binnendijkse brakke wateren in Nederland, want er zijn te weinig meetdata beschikbaar;

- Ecologische effecten van 'gemiddelde' zoutgehaltenes zijn redelijk bekend, effecten van (onnatuurlijke) fluctuaties en tijdelijke piekconcentraties, of gecombineerde effecten van verschillende stress-factoren zijn nog nauwelijks in beeld;
- Vaak is het nog onduidelijk welke processen ten grondslag liggen aan gevonden verbanden tussen abiotische condities en soortvoorkomens;
- Er is onvoldoende inzicht in de belangrijkste (microbiële) processen die de nutriëntenkringlopen in brakke wateren bepalen. Dit geldt met name voor interactie tussen het oppervlaktewater en het sediment en het belang van het lichtklimaat voor waterplanten.
- De rol van connectiviteit tussen brakke wateren en hun omgeving is niet onderzocht.

Voor een beter systeembegrip van brakke wateren is het van belang om:

- De aanwezige sedimentcondities mee te nemen in monitoring (o.a. concentraties chloride en nutriënten);
- Inzicht te krijgen in de water- en stoffenbalansen (kwantitatief inzicht in kwel, waterinlaat etc.),
- Meer inzicht te krijgen in de lokale invloed van brakke kwel. Met behulp van de hieruit voortkomende resultaten kan het functioneren van het systeem beter geanalyseerd worden, de potenties voor behoud en herstel beter in beeld gebracht worden en kan de doelaflleiding en daarmee het handelingsperspectief beter opgesteld worden.

Door de opdrachtgevers aangeleverd overzicht van lopende zaken en recent afgerond onderzoek

Projecten gerelateerd aan verziltingsproblematiek:

- Kennisprogramma zeespiegelstijging:
 - Systeemkennis: verzilting bij zeespiegelstijging en lagere afvoeren
 - Zoutindringing bij sluizen verminderen
 - Waterbeheer om verzilting te verminderen op gevoelige zoetwaterinname locaties, zoals drinkwater, landbouw of natuur.
 - Effecten op watergebruikers (met expert kennis)
- KZH en Slim Watermanagement: met waterbeheer verziltingsdruk minimaliseren
 - Deltaplan Agrarisch Waterbeheer: pilots, waaronder wateropslag, optimalisering agrarische praktijk voor omgaan met zouter water – in samenwerking met waterschappen, IenW, LNV en LTO
 - Kartering zoet-zout ondergrond: Freshem-NL
 - Saltisolutions – onderzoek estuaria – vooral hoofdwatersysteem - NWO
 - Agricoast – verziltingsbestendige landbouw - NWO
 - Coastar: slim gebruik van de ondergrond
 - Living lab Schouwen-Duiveland – omgaan met verziltende omstandigheden
 - Brijn: toepassing, regelgeving, knelpunten (onderzoek IenW)

Vanuit DPZW worden volgende projecten mee gefinancierd:

- Noord
 - Freshem-NL
 - Onderzoek anti-verziltingsmaatregelen Sluis Harlingen
 - Proeftuin landbouwprojecten: Zoete toekomst Texel (2e fase)
 - Proeftuin landbouwprojecten: Vervolg Spaarwater Flevoland
 - Proeftuin landbouwprojecten: Stimuleren implementatie Spaarwatermaatregelen + Boeren-Meten-Water
 - Hergebruik RWZI effluent Garmerwolde
 - (Proeftuin landbouwprojecten: Zoet op Zout Lauwersmeer)
 - (Proeftuin landbouwprojecten: Salfar)
- West
 - COASTAR pilot brakwater-winning kust(duinen)
 - COASTAR case Rotterdam, cities2recharge
 - Beter benutten Bergsluis
 - (Temmen brakke kwel)

- (COASTAR pilot Westland)
- (Coaster pilot brakwaterwinning polders (droogmakerij))
- Zuid-West
 - Slim regionaal waterbeheer
 - Pilot(s) hergebruik effluent
 - Uitrollen proeftuin zoetwater
 - Ondergrondse wateropslag Wolphaartsdijk onderzoek, infiltratie en aanleg ontstekingsvoorzieningen [5]
 - Verkenning benutting brak grondwater voor drinkwater-voorziening
 - Rivierengebied
 - Verplaatsing inlaat Alblasserwaard

Kennisnetwerken:

- Salta (omgaan met verzilting in Delta's) – net opgericht
- Coaster (gebruik van de ondergrond)

LNV:

- Landbouw
 - Actieprogramma klimaatadaptatie landbouw (2020, AP KAL, Kamerbrief 2022 over stand van zaken AP KAL en vervolgaanpak tot 2027, o.a. gebaseerd op Inventarisatie van WR over risico's, knelpunten en kansen in de land- en tuinbouw, incl. aanbevelingen voor langere termijn, 2022). Het (beter) omgaan met verzilting in de toekomst maakt hier onderdeel van uit.
 - Brochure Kennis en Innovatie voor Klimaatadaptatie in de landbouw, waarin ondernemers in de land- en tuinbouw, overheden en andere betrokken partijen een overzicht vinden van de inzet en geboekte resultaten op kennisontwikkeling, -verspreiding en innovatie voor een klimaatrobuste agro-sector. Ook worden belangrijke kennisvragen en -projecten voor komende jaren toegelicht.
 - Onderzoeksagenda verzilting en zoute landbouw (2024, BO-onderzoek LNV): Het formuleren van een gedragen onderzoeksagenda voor het beperken van de impact van de verziltingsproblematiek voor de agrarische sector en het verkennen van de mogelijkheden hierop in te spelen. Dit is een aanvulling op het werk van Kenniscluster Verzilting 'Salta', dat zich richt op het omgaan met verzilting in de landbouw, inclusief het bevorderen van waterbeschikbaarheid. Het LNV-BO-onderzoek richt zich vooral op de ontwikkeling van zilttolerante en zilte teelten. Ook wordt bekeken of de FAO-guidelines op verzilting in de Nlse landbouw kunnen worden toegepast.
 - Kennisprogramma Klimaat- en water-robuste land- en tuinbouw in 2050: van Optimalisatie naar Transformatie. Vanuit toekomstscenario's wordt met stakeholders toegewerkt naar een landelijke en regionale innovatieagenda voor landbouw en beleid op het gebied van klimaatadaptatie.
 - Project Zoetwaterboeren zet in op ontwikkelen, onderzoeken en demonstreren van duurzaam watersysteem in de volle breedte: van wateraanbod, -opslag, -vraag, -gift tot waterkwaliteit. In kustgebieden is ook aandacht voor verzilting.
 - Laag NL 2050, waar in de casus Schouwen-Duiveland aandacht is voor verzilting, water bodem sturend en waterbeschikbaarheid.
 - Motivaction-onderzoek Klimaatadaptatie in de land- en tuinbouw, een brede consultatie onder agrarisch ondernemers over urgentie, het nemen van adaptieve maatregelen, knelpunten e.d. Hierin is ook aandacht voor verzilting en kustgebieden. Wordt voorjaar 2024 afgerond.
 - Inzet via NPLG/Ontwerp NPLG op klimaatadaptatie landelijk gebied, landbouw en natuur, waarbij inzet is gepleegd om ook omgaan met verzilting goed mee te laten nemen in de provinciale plannen voor het landelijk gebied. Vooral van belang voor de kustprovincies en Flevoland. In de loop van 2024 wordt meer bekend hoe provincies dit invulling geven (maatregelpakketten).
 - Gezamenlijke uitvraag IenW, Stowa en LNV om ENZD-advies te laten invullen gericht op verbetering van de inzichten op zouttolerantie van gewassen, bodem en zoetwaternatuur.

- Natuur
 - In algemene zin meer inzichten nodig inzake gevolgen (risico's en kansen) van verzilting voor (zoetwater)natuur.
 - Zie hierboven bij landbouw bij uitvraag ENZD-advies op o.a. zouttolerantie zoetwaternatuur.
 - Voor de Natura 2000-gebieden wordt er naar verwachting de komende periode een meerjarig onderzoek uitgevraagd naar de effecten van klimaatverandering, waaronder verzilting, op deze gebieden en de gevoeligheid van verschillende habitattypen voor o.a. verzilting. Er zal worden gekeken naar maatregelen die deze effecten in kunnen perken en er zal mogelijk een ruimtelijke kansen en knelpunten kaart opgesteld worden.
 - In 2024 wordt naar verwachting in het najaar het Actieprogramma klimaatadaptatie natuur opgeleverd, ter specificatie en nadere invulling van de eerdere Actielijnen k.a. natuur. Acties uit het programma bevatten o.a. het in kaart brengen van de kwetsbaarheden van natuur voor klimaateffecten en het ontwikkelen van handelingsperspectief om deze effecten in te perken, ook buiten de Natura 2000-gebieden.

Afgeronde projecten:

- Water Nexus (uitwisseling landbouw-industrie, watertech, wetlands ea)
- Salfar Interreg-project? (zouttolerante gewassen, bodemmanagement, passende bemesting)
- Zoet-zout knooppunt (heeft geleide tot Kenniscluster Verzilting 'Salta')
- Spaarwater
- Proeftuin Texel