

Samenvatting en conclusies

Motivatie

Meer dan 50% van de wereldbevolking woont in kustgebieden en is afhankelijk van zoete grondwatervoorraden voor drinkwater, landbouw en industriële doeleinden. Echter, in veel kustgebieden is het grondwater brak of zout wat de duurzame exploitatie van zoet grondwater bemoeilijkt of zelfs onmogelijk maakt. In de laaggelegen kustgebieden onder zeeniveau kan het brak-zoute grondwater het oppervlak bereiken door opwaartse stroming. Dit proces wordt aangeduid als zoute kwel en is het hoofdonderwerp van dit proefschrift. Zoute kwel leidt tot verzilting van het oppervlaktewater, het ondiep grondwater en het bodemwater in de wortelzone. Het ligt in de verwachting dat door de voorspelde klimaatverandering en toekomstige stijging van de zeespiegel, de zoute kwel zal toenemen en de beschikbaarheid van zoet grond- en oppervlaktewater zal afnemen. Het voorspellen van effecten van toekomstige veranderingen, het definiëren van een effectieve watermanagementstra-

tegie voor een klimaat-robuste, duurzame zoetwatervoorziening en de inzet van succesvolle maatregelen, zijn alleen mogelijk als alle relevante processen van zoute kwel worden begrepen. Dit proefschrift beschrijft de ruimtelijke variabiliteit en temporele dynamiek van verziltingsprocessen door zoute kwel in deltagebieden. De nadruk van het onderzoek lag op preferente zoute kwel via wellen en de interactie tussen dunne regenwaterlenzen en zoute kwel. Deze twee processen zijn aangemerkt als zeer belangrijke verziltingsprocessen in de Nederlandse delta, het studiegebied van dit PhD-onderzoek. De preferente zoute kwel leidt tot verzilting van het oppervlaktewater en speelt vooral in diepe polders (Deel I). De interactie tussen dunne regenwaterlenzen en zoute kwel leidt tot de verzilting van het ondiepe grondwater en de wortelzone en speelt vooral in de zuidwestelijke delta en het noordelijke kustgebied (Deel II).

Onderzoek

De ruimtelijke variabiliteit en temporele dynamiek van verziltingsprocessen door zoute kwel zijn onderzocht en gekwantificeerd door veldonderzoek te combineren met numerieke en analytische berekeningen. Uiteenlopende veldtechnieken zijn toegepast op verschillende schaalniveaus, variërend van lokale puntmetingen tot metingen op polderschaal en eilandniveau. Het onderzoek naar (preferente) zoute kwel processen in diepe polders (Deel I) is uitgevoerd in twee West-Nederlandse droogmakerijen: Polder de Noordplas en de Haarlemmermeerpolder. Twee wellen zijn in detail onderzocht en een uitgebreid monitoring campagne is uitgevoerd in Polder de Noordplas om de belangrijkste

zoutbronnen in beeld te brengen en hun in de tijd variërende bijdrage aan de verzilting van het oppervlaktewater te kwantificeren. Het onderzoek naar de karakteristieken en het temporele gedrag van dunne regenwaterlenzen en hun interacties met zoute kwel (Deel II) is uitgevoerd in de zuidwestelijke delta (provincie Zeeland). Door de combinatie van verschillende meettechnieken konden karakteristieken van regenwaterlenzen verkregen uit puntmetingen (prikstok TEC-probe, elektrische sonderingen ECPT, bemonstering en analyse van grond- en bodemwater), worden geëxtrapoleerd naar het niveau van landbouwpercelen gebruikmakend van CVES (continue verticale elektrische sonderingen) en elek-

tromagnetische metingen (EM31). Het was zelfs mogelijk om de karakteristieken van regenlenzen voor een groot deel van het eiland Schouwen-Duivenland te karteren door gebruik te maken van elektromagnetische metingen vanuit een helikopter (HEM). Vervolgens zijn op basis van deze metingen twee typische landbouwpercelen geselecteerd om de dynamiek van de lenzen te onderzoeken. Hiertoe is voor een

periode van 2 jaar, elke maand het zoutgehalte van het bodem- en grondwater op verschillende dieptes gemeten, in combinatie met hoogfrequente metingen (ieder uur) van de grondwaterstand, neerslag, drainwaterafvoer en het zoutgehalte van het drainwater. Numerieke modellen zijn gebruikt om de processen te analyseren die de karakteristieken van de regenwaterlenzen en hun dynamisch gedrag bepalen.

Resultaten en conclusies

Deel I: preferente zoute kwel via wellen

Op basis van veldwaarnemingen en -metingen, zijn drie typen kwel in een diepe polder onderscheiden die variëren in zowel flux als zoutgehalte (Fig. 1): (i) diffuse achtergrondkwel door de slecht doorlatende sedimenten (klei, veen) van de Holocene deklaag, (ii) zandbanenkwel door goed doorlatende zandbanen in de

Holocene deklaag, en (iii) intense preferente kwel via wellen. Wellen zijn dunne open kanalen in de Holocene deklaag die het eerste watervoerende pakket met het oppervlak verbinden en waardoor kwelwater preferent met hoge snelheid (10^2 tot 10^4 m d⁻¹) naar het oppervlak stroomt. De grootste kwelfluxen en zoutgehaltenes in de polder zijn gemeten in wellen. De

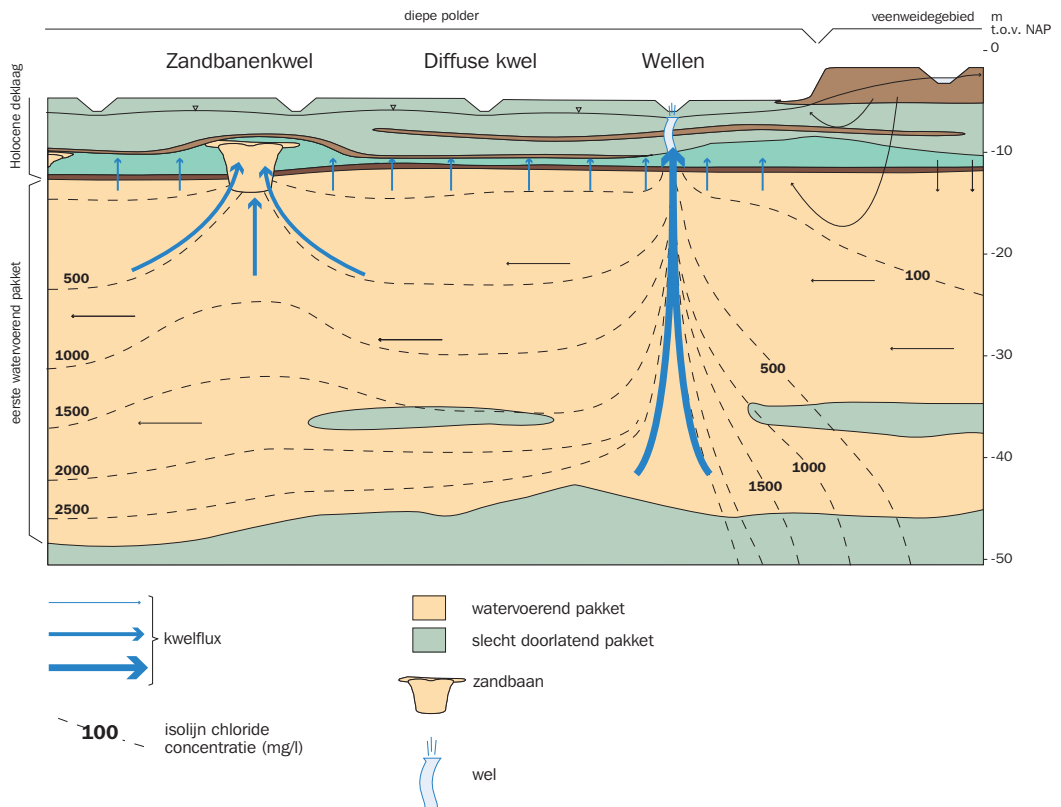


Fig. 1. Drie typen kwel in een diepe polder met verschillende fluxen en zoutgehaltenes

gemiddelde gemeten Cl-concentraties in wellen voor Polder de Noordplas en de Haarlemmermeerpolder waren respectievelijk 1100 mg L⁻¹ en 1500 mg L⁻¹ met een maximum van meer dan 5000 mg L⁻¹ in de Haarlemmermeerpolder. De meeste zandbanen doorsnijden het onderste en minst doorlatende deel van de Holocene deklaag waardoor grotere kwelfluxen met hogere Cl-concentraties (~600 mg L⁻¹) zijn gevonden voor zandbanenkwel dan voor diffuse kwel (~100 mg L⁻¹). De verschillen in zoutgehaltes van de drie typen kwel worden veroorzaakt door een combinatie van (1) het typische zoutprofiel dat onder de Holocene deklaag in de diepe polders van West-Nederland wordt aangetroffen (namelijk 5 – 15 m zoet water dat geleidelijk toeneemt in zoutgehalte met de diepte) en (2) het 'upconing' (opkegel) mechanisme. Geconcentreerde vormen van kwel met hoge snelheden trekken grondwater van diepere lagen en daardoor met hogere zoutgehaltes aan dan diffuse kwel met lage snelheden (Fig. 1). Diffuse kwelsystemen voeren voornamelijk zoet grondwater afkomstig van het bovenste deel van het eerste watervoerende pakket af.

Om de water- en zoutfluxen in een diepe polder op dagelijkse basis te kunnen kwantificeren, daarbij rekening houdend met de onzekerheid van parameters, is een probabilistisch (GLUE) dynamisch water- en zoutbalans model op dagelijkse basis opgesteld en succesvol toegepast voor Polder de Noordplas. De onzekerheid van de inputparameters is meegenomen door hun waarden random te samplen uit uniforme parameterverdelingen die zijn gebaseerd op metingen. Vervolgens is het model gekalibreerd op dagelijkse tot wekelijkse metingen van de hoeveelheid uitgemalen polderwater, het zoutgehalte en zoutvrachten, en grondwaterstanden in de polder. Dit leverde een set combinaties van inputparameters op die het totale systeem even goed konden simuleren. Met deze set aan 'behavioural' parametercombinaties zijn de bijdragen en bijbehorende onzekerheid van alle bronnen

aan de water- en zoutbalans van de diepe polder gekwantificeerd, evenals het effect van verschillende toekomstscenario's. De resultaten tonen onomstotelijk aan dat wellen verreweg de meeste dominante verziltingsbron in Polder de Noordplas zijn, met een bijdrage van gemiddeld 66% ($\pm 7.2\%$) aan de totale zoutvracht van de polder en met slechts een 15% ($\pm 4.7\%$) bijdrage aan de totale waterflux. Gezien het algemeen voorkomen van zoute wellen in de Nederlandse diepe polders en de typische zoutverdeling in de ondergrond (zoet boven zout grondwater), kunnen we stellen dat wellen de meest waarschijnlijke dominante verziltingsbron in de meeste Nederlandse diepe polders zijn.

De hoge bijdrage van wellen aan de zoutbelasting komt door het veel hogere zoutgehalte van grondwater dat via wellen aan de oppervlakte komt dan via zandbanen en diffuse kwel. Veldmetingen in Polder de Noordplas en Haarlemmermeerpolder en numerieke simulaties tonen aan dat zoutwater 'upconing' het proces is dat leidt tot de hoge zoutgehaltes van welwater. De simulaties laten zien dat het welwater bestaat uit een mix van grondwater afkomstig van verschillende dieptes met verschillende zoutgehaltes. In een situatie zonder regionale stroming draagt het gehele eerste watervoerende pakket bij aan de afvoer van een wel. Het mixen vindt voornamelijk plaats dicht bij de wel waar stroombanen van grondwater met verschillende zoutgehaltes convergeren. De bijdrage van verschillende dieptes aan de afvoer van welwater laat een inverse relatie zien met de zoutverdeling in het eerste watervoerende pakket. Dit betekent dat de wel per meter watervoerend pakket meer ondiep grondwater met een laag zoutgehalte onttrekt dan diep grondwater met een hoog zoutgehalte. Dit is te wijden aan het 'buoyancy'-effect (opwaartse kracht) veroorzaakt door dichtheidsverschillen van grondwater (door verschillen in zoutgehalte) die een extra opwaartse kracht geven aan het zoetere, lichtere grondwater. De belangrijkste factoren die het 'upconing'

mechanisme van wellen en daardoor het zoutgehalte van wellen bepalen, zijn: (i) de afvoer van een wel, (ii) horizontale doorlatendheid van het watervoerend pakket, en (iii) de zoutverdeling (= dichtheidsverdeling) van het grondwater in het watervoerend pakket. Bepalend bij de zoutverdeling zijn de diepte van de overgangszone en het dichtheidsverschil tussen het grondwater boven en onder de overgangszone, terwijl de dikte van de overgangszone nauwelijks een rol speelt. Het 'upconing' mechanisme van geclusterde wellen, dat wil zeggen meerdere uitstroombopeningen binnen een gebiedje van 20-100 m², is een functie van de totale afvoer van een welcluster. De variatie in zoutgehalte tussen de wellen binnen een cluster wordt bepaald door de afvoer van een individuele wel en zijn positie ten opzichte van andere wellen in het cluster. Regionale laterale grondwaterstroming beïnvloedt zeer sterk het stromingspatroon rondom de wel waarbij het watervoerend pakket wordt onderverdeeld in een lokaal welsysteem bovenop het regionale grondwatersysteem. Ondanks dit grote effect op de grondwaterstroming heeft regionale stroming slechts een klein effect op de

relatieve bijdragen van zoet en zout grondwater aan de welafvoer en dus op het zoutgehalte van de wel.

Deel II: Dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden

Puntmetingen (TEC, ECPT) op 30 landbouwpercelen met zoute kwel laten een geleidelijke overgangszone (mix-zone) zien tussen geïnfilteerd regenwater en opwaarts stromend zout kwelwater (Fig. 2). Het midden van deze mix-zone (D_{mix}) zit op een zeer geringe diepte, gemiddeld 1.7 m beneden maaiveld, en in bijna alle onderzochte regenwaterlenzen werd geen zoet grondwater aangetroffen (zoet = Cl < 300 mg L⁻¹). Op basis van deze metingen is de dunne regenwaterlens in gebieden met zoute kwel (verder aangeduid als RW-lens) gedefinieerd als het volledige grondwaterlichaam van grondwaterstand tot aan de basis van de mix-zone (B_{mix}). B_{mix} is de diepte waar beneden geen menging met regenwater plaatsvindt en waar het zoutgehalte dus gelijk is aan het zoutgehalte van het regionale grondwater (Fig. 2). Met deze definitie is de RW-lens dus geen pure zoetwaterlens en variëren zoutgehaltes

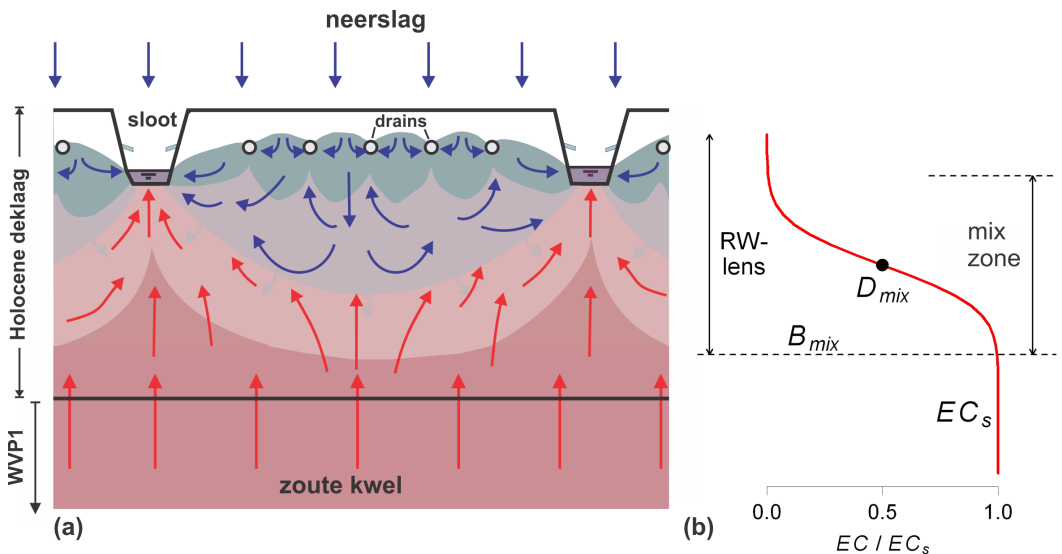


Fig. 2. (a) Schematische weergave van een regenwaterlens in een zoute kwelgebied (RW-lens). (b) Profiel van het zoutgehalte van het grondwater met de diepte. D_{mix} is het midden van de mix-zone waar het zoutgehalte (EC) de helft van het zoutgehalte van het kwelwater (EC_s) is. B_{mix} is de basis van de mix-zone waar het zoutgehalte gelijk is aan dat van het zoute kwelwater (EC_s).

binnen de RW-lens zowel in ruimte, diepte als in tijd. B_{mix} werd op een gemiddelde diepte van 2.8 m beneden maaiveld aangetroffen. ECPT-metingen laten zien dat beneden B_{mix} het zoutgehalte constant met de diepte blijft tot minimaal een diepte van 25 m (= diepte van de ECPT-metingen).

De geringe dikte van de RW-lens wordt primair veroorzaakt door de permanent opwaartse grondwaterstroming van het eerste watervoerende pakket (WVP1) naar de slechtdoorlatende Holocene deklaag (Fig. 2). Dit voorkomt dat geïnfiltreerd regenwater het eerste watervoerende pakket bereikt. In tegenstelling tot deze RW-lenzen in zoute kwelgebieden, wordt de neerwaartse stroming van regenwater in infiltratiegebieden (bij afwezigheid van slechtdoorlatende kleilagen) alleen maar beperkt door de 'buoyancy' kracht van het onderliggende zoute grondwater. De dichtheid van dit zoute grondwater bepaalt in belangrijke mate de dikte van de lens volgens het Badon Ghyben Herzberg principe. Deze systemen produceren daardoor veel dikkere zoetwaterlenzen (BGH-lenzen), variërend van 5-15 m dikke lenzen in zandige kreekruggen tot 100 m dikke lenzen in de duinen. Na vaststelling dat RW-lenzen in kwelgebieden zich uitsluitend in de slechtdoorlatende Holocene deklaag ontwikkelen, zijn de stromingsprocessen in de deklaag nader onderzocht met numerieke modellen. Om deze processen beter te kunnen duiden en begrijpen, is het verticale stromingsstagnatiepunt (FLSP, 'vertical flow stagnation point') geïntroduceerd wat het punt aangeeft waar beneden de stroming verandert van een neerwaartse naar een opwaartse component. De FLSP tussen 2 drainagebuizen fluctueert met de grondwaterstand waarbij een stijgende grondwaterstand resulteert in een diepere FLSP. De stroming is neerwaarts in een groot deel van de RW-lens met een hoge grondwaterstand terwijl alle stroming in een RW-lens omhoog is gericht zodra de grondwaterstand beneden drainageniveau zakt. De numerieke resultaten tonen

aan dat dit oscillerende, door grondwaterstandsfluctuaties gedreven verticale stromingsregiem, het mix-mechanisme tussen regenwater en zoute kwel is en de diepte en dikte van de mix-zone bepaalt. Grondwateraanvulling, kwelflux en drainage diepte zijn de belangrijkste factoren die op dit mechanisme invloed hebben.

De veldmetingen laten zien dat de dikte van de RW-lens (van B_{mix} tot grondwaterspiegel) varieert met ongeveer 1.2 m op jaarbasis en reageert op individuele regenbuien. De positie van D_{mix} verandert veel minder in de tijd (< 0.25 m), en fluctueert op een veel langere, seizoensale tijdschaal. De basis van de RW-lens (B_{mix}) blijft vrijwel op dezelfde positie. Numerieke simulaties laten zien dat deze kleine verplaatsing van de mix-zone kan worden toegeschreven aan het trage oscillerende stromingsregiem in het permanent verzadigde deel van de RW-lens. Stromings- en mix-processen zijn veel sneller in de zone waarin de grondwaterspiegel fluctueert door de dagelijkse variatie van neerslag, verdamping en drainage, en waar verzadigde en onverzadigde condities elkaar continu afwisselen. Wanneer de grondwaterspiegel daalt, blijft het meeste water van de RW-lens met opgelost zout achter als bodemwater. Als de bodem dan weer verzadigd raakt, mixt het achtergebleven bodemwater met slechts een klein deel geïnfiltreerd regenwater. Het zoutgehalte van het grondwater na mixen zal dus erg lijken op het zoutgehalte van het bodemwater voor verzadiging en dit verklaart de afwezigheid van zoet grondwater in bijna alle onderzochte RW-lenzen. Hoewel de mix-processen snel zijn, heeft de tijdelijke berging van zout in het bodemwater dus een belangrijk dempend effect op variaties in zoutgehaltes van het grondwater wanneer de lens groeit door infiltrerend regenwater. Het zoutgehalte van het bodemwater vertoont een seizoensvariatie met lagere zoutgehaltes tijdens de winter en hoge zoutgehaltes tijdens de zomer. Zout migreert omhoog richting de wortelzone door capillaire opstijging van het bovenste grondwater.

Wanneer gedurende het zomerhalfjaar de grondwaterstand daalt, zal het water dat via de capillaire poriën opstijgt van steeds grotere diepte komen en dus zouter zijn. Metingen tonen aan dat het zoutgehalte van het bodemwater zelfs veel hoger kan worden dan dat van het grondwater. Dit wordt veroorzaakt door het niet-synchrone effect van capillaire opstijging van zout water tijdens droge perioden en infiltratie van regenwater door scheuren

(macro-poriën). Preferente stroming via scheuren speelt ook een belangrijke rol bij de snelle reactie van de drainage-afvoer op individuele regenbuien. Geïnfiltreerd regenwater en grondwater van verschillende dieptes in de RW-lens met verschillende zoutgehaltes dragen bij aan de drainage-afvoer in verhoudingen die variëren op een tijdschaal van uren tot dagen, en dit veroorzaakt het sterk dynamische karakter van het zoutgehalte van drainagewater.

Implicaties voor de zoetwatervoorziening in de Nederlandse delta

Dit onderzoek draagt bij aan de doelstellingen van het Deelprogramma Zoetwater van het Deltaprogramma door het aanleveren van nieuwe en kwantitatieve kennis van verziltingsprocessen door zoute kwel in de Nederlandse delta. Deze kennis biedt een wetenschappelijke basis voor het formuleren van monitoringstrategieën, effectieve maatregelen en oplossingen en lange termijn strategieën voor een duurzame en economisch haalbare zoetwatervoorziening.

Het onderzoek laat zien dat lokale zoute kwelprocessen grote implicaties hebben voor de verzilting van regionale watersystemen. De zeer lokaal voorkomende wellen zijn dominant in de verzilting van veel diepe polders en effectieve maatregelen tegen verzilting moeten dan ook gericht zijn op het aanpakken van de bijdrage van wellen. Veldproeven hebben aangetoond dat het dichten van natuurlijke wellen (ontstaan door opbarsting van de deklaag) erg lastig is door de grote kans op het ontstaan van nieuwe wellen in bestaande scheuren. Peilopzet kan effectief zijn bij een flinke peilverhoging (> 0.5 m) in sloten waar grote wellen voorkomen. Echter, het verminderen van de zoutbelasting in diepe polders door zoute kwel blijft een lastige opgave. De belangrijkste boodschap is dan ook dat zoveel mogelijk moet worden voorkomen dat er nieuwe wellen ontstaan door activiteiten zoals graven in de deklaag en aanleg van infrastructurele

werken. Met het gegeven dat de zoutbelasting niet minder zal worden in de toekomst, is het zinvol om naar oplossingen te zoeken voor een optimalere vorm van zoetwatervoorziening. Er zijn veel mogelijkheden maar alle oplossingen vergen maatwerk en kennis van het watersysteem in al zijn aspecten. Voor kapitaalcrachtige gewassen kan worden gezocht naar mogelijkheden voor ondergrondse opslag van zoetwater in natte tijden voor gebruik in droge tijden. Operationeel zoutwaterbeheer (sturen op zout) is een kansrijke oplossing op grotere schaal. Met operationeel zoutwaterbeheer wordt bedoeld het dynamische operationele beheer van uitmalen, inlaten van zoet water, en tijdelijk bergen van zout kwelwater op basis van weersvoorspellingen en real-time zoutmonitoring op strategische locaties in de polder. Het tijdelijk isoleren van peilvakken met veel zoute wellen in droge tijden kan eenvoudig plaatsvinden met behulp van automatische stuwtejes. Afvoer van het tijdelijk geborgen zoute water vindt vervolgens plaats tijdens regenbuien wanneer zoutconcentraties laag zijn.

De dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden, zoals in de zuidwestelijke delta en het noordelijke kustgebied, zijn erg kwetsbaar voor klimaatverandering. De verwachte drogere zomers zullen leiden tot nog dunnere lenzen en een toename van zoutconcentraties in zowel de regenwaterlens als in de onverzadigde bodem erboven. In gebieden zonder

zoetwateraanvoer vanuit het hoofdwatersysteem, zoals in grote delen van de zuidwestelijke delta, is de landbouw in kwelgebieden voor de zoetwatervoorziening aangewezen op deze dunne neerslaglenzen. De lensdikte en dynamische gedrag van zoutgehaltes in het bodem- en grondwater zijn daarom van groot belang voor de landbouw. Naast de kwelflux en meteorologische omstandigheden (neerslag en verdamping), wordt de dikte van regenwaterlenzen en de dynamiek daarvan sterk bepaald door buisdrainage. Hoewel aan de eerste twee natuurlijke factoren weinig valt te doen, is het goed mogelijk om nieuwe drainagesystemen te ontwikkelen die de regenwaterlens laten groeien en daardoor de zoutgehaltes in de

wortelzone beperken. Ook is ondergrondse opslag van zoet water in nabijgelegen kreekruggen een kansrijke oplossing om de zelfvoorzienendheid van agrariërs voor hun zoetwaterbehoefte in droge tijden te vergroten. Deze typen lokale oplossingen worden momenteel uitgebreid getest in de zuidwestelijke delta binnen het Kennis voor Klimaat-project 'Go-Fresh'.

Ten slotte, de kennis en ervaring die in de Nederlandse delta worden opgedaan met het vinden van oplossingen voor een duurzame en economisch haalbare zoetwatervoorziening in een veranderd klimaat, kunnen worden toegepast in andere delta's en kustgebieden in de wereld waar de zoetwatervoorziening onder druk staat.

