



Experiment / pilot

> Regenwaterlenzen

IDEA/EXPLORATION



PROOF OF CONCEPT



EXPERIMENT/PILOT



IMPLEMENTATION/IN OPERATION

INHOUD

INLEIDING
GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
STRATEGIE: VASTHOUDEN, BERGEN, AANVOEREN
WERKING
TYOLOGIE EN MOGELIJKE BEHEERMAATREGELEN
KOSTEN EN BATEN
GOVERNANCE
PRAKTIJKERVARINGEN EN LOPENDE ONDERZOEKEN
KENNISLEEMTEN
LITERATUUR EN LINKS
DISCLAIMER

INLEIDING

Een groot deel van Nederland ligt onder de huidige zeespiegel. Dit lager gelegen land is sinds de laatste ijstijd regelmatig overstroomd door de zee waardoor zeewater in de onderliggende zandpakketten kon infiltreren. Sinds de aanleg van polders treedt er kwel op en stroomt dit zoute grondwater weer richting het oppervlak met verzilting van het oppervlaktewater, het ondiepe grondwater en soms de wortelzone tot gevolg. Hierdoor is op sommige plaatsen het oppervlaktewater en het grondwater ongeschikt voor het beregenen van gewassen. Gewassen ondervinden ook zoutschade wanneer het zoute kwelwater via capillaire opstijging de wortelzone bereikt.

Gelukkig kent Nederland een neerslagoverschot waardoor er zoete regenwaterlenzen op het brakke tot zoute grondwater bestaan. In de huidige situatie zijn regenwaterlenzen in zoute gebieden van groot belang voor de landbouw. De dikte, vorm en dynamiek van deze lenzen verschillen van gebied tot gebied. Verschillende factoren hebben hier invloed op, zoals de geohydrologische opbouw, de ontwatering, het peilbeheer, de kwel- en infiltratieflux en de grondwateraanvulling.

Door klimaatverandering met als gevolg drogere zomers en zeespiegelstijging kan het watersysteem zodanig onder druk komen te staan dat de zoete grondwateraanvoorraad op perceelsniveau en de regionale zoetwateraanvoorraad in gevaar komen. Uit onderzoek blijkt dat een relatief kleine toename van de zoute kwel en een kleine afname van het neerslagoverschot in de zomer de zoetwateraanvoorraad op perceelsniveau significant kunnen verminderen (De Louw, 2013). Daarnaast kunnen de bestaande dikkere zoetwaterlenzen onder hooggelegen zandlichamen zoals duinen en kreekruggen (in infiltratiegebieden) worden vergroot door actieve infiltratie waardoor de zoetwaterbeschikbaarheid wordt vergroot.

Dit deltafact gaat in op de recente inzichten in de eigenschappen en het vóórkomen van de regenwaterlenzen in gebieden met zout grondwater. Het geeft een overzicht van mogelijke toekomstige bedreigingen en beheersopties.

In gebieden die niet onder invloed van de zee staan, zoals de hogere delen van Nederland, komen als gevolg van genoemde scheiding tussen grond- en regenwater ook regenwaterlenzen voor die lokaal van belang zijn in bijvoorbeeld voedselarme veengebieden. Dit soort lenzen vallen buiten het bestek van dit deltafact.

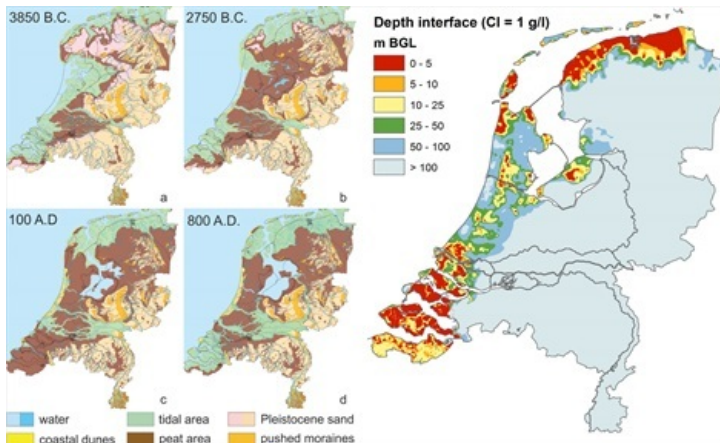
GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS

Trefwoorden: zoetwateraanvoorraad, verzilting, zoutschade, zoetwaterlens, zoute kwel

STRATEGIE: VASTHOUDEN, BERGEN, AANVOEREN

Het bevorderen en beschermen van regenwaterlenzen is een strategie van **vasthouden** van zoet water in een bodem met zout grondwater.

Verschillende delen van laag-Nederland hebben tijdens de Holocene zeespiegelstijgingen en de daarbij behorende fases van transgressie en regressie (verschuivingen van de kustlijn) gedurende enige tijd blootgestaan aan overspoeling met zeewater. Hierdoor is in de hier voorkomende zanderige Pleistocene ondergrond brak tot zout grondwater aanwezig. De diepte van het brak-zoute grondwater varieert zeer sterk tot minder dan 5 m in grote delen van de zuidwestelijke delta en het noordelijke kustgebied tot 25-50 m diepte in west-Nederland (zie onderstaande figuur).

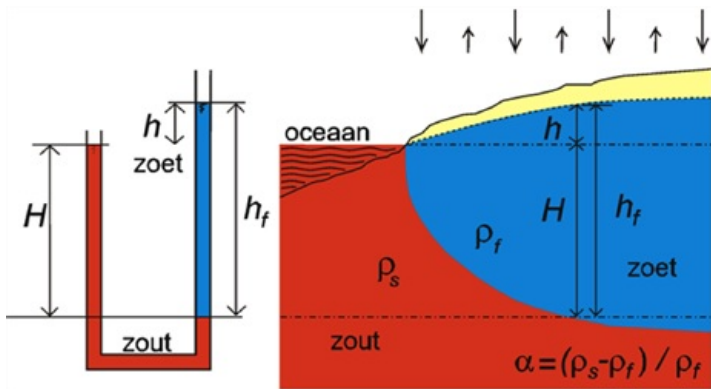


Palaeogeografische kaarten van Nederland gedurende het Holoceen die het voorkomen van zout grondwater in de ondergrond hebben bepaald. De maximale uitbreiding van de zee (3850 AC) geeft het gebied aan waar het zoute grondwater binnen 100 m diepte wordt aangetroffen. In de gebieden die op geologische tijdschaal recentelijk nog overstromd waren door de zee (800 AD) wordt het zoute grondwater zeer ondiep aangetroffen (< 5 m) zoals in Zeeland en Friesland-Groningen.

Er is een belangrijk onderscheid in regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden en zoetwaterlenzen in infiltratiegebieden. In de infiltratiegebieden worden zoetwaterlenzen aangetroffen van 5 tot 100 m dik terwijl de regenwaterlenzen in kwelgebieden vaak niet dikker zijn dan 3 m omdat de opwaartse stroming de infiltratie van regenwater voorkomt. In kwelgebieden wordt gesproken over regenwaterlenzen en niet over zoetwaterlenzen omdat het grondwater in deze lenzen vaak al brak of zout zijn door menging met het zoute kwelwater. Deze dunne regenwaterlenzen zijn van groot belang voor de landbouw, ze reguleren namelijk het zoutgehalte in de wortelzone. Regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden zijn erg kwetsbaar voor de effecten van klimaatverandering. Vooral het risico dat zout water de wortelzone van landbouwgewassen bereikt neemt toe. Door beheersmaatregelen kan dit effect worden tegengegaan. De dikkere zoetwaterlenzen onder duinen en kreekruggen zijn van groot belang als zoetwatervoorraad waaruit onttrokken kan worden voor beregening. De duinen bevatten strategische grondwatervoorraden voor drinkwater.

WERKING

Zeewater heeft een hogere dichtheid (ρ_s is ongeveer 1025 kg/m^3) dan zoet (regen)water (ρ_f is ongeveer 1000 kg/m^3). Een direct gevolg hiervan is dat onder statische omstandigheden zoet water 'drijft' op zout water, analoog aan het drijven van ijs (met lagere dichtheid) in water. In deze situatie leidt het drijfvermogen van zoet water in combinatie met de koepelvormige opbolling van grondwaterspiegels tot de vorming van zoetwaterlenzen. De eenvoudigste vorm hiervan doet zich voor in de kustduinen, waar zich in een relatief homogeen (zand)pakket dikke regenwaterlenzen vormen. Het vóórkomen van deze lenzen is een klassiek voorbeeld van een wetenschappelijke voorspelling in de hydrologie. Ruim een eeuw geleden lieten **Badon Ghijben** (Badon Ghijben, 1889) en Herzberg (Herzberg, 1901) theoretisch zien (BGH-principe) dat op basis van het verschil in dichtheid tussen regenwater en zout (zee)water bij een opbolling van de grondwaterspiegel h boven zeeniveau, de onderkant van een regenwaterlens op een diepte $H = \rho_f / (\rho_s - \rho_f) \times h$ onder zeeniveau ligt. Bij een zeewaterdichtheid $\rho_s = 1025 \text{ kg/m}^3$ geldt dan $H = 40 \times h$. De dikte van de zoetwaterlens wordt dan $41 \times h$. In onderstaand figuur is deze vergelijking geïllustreerd.



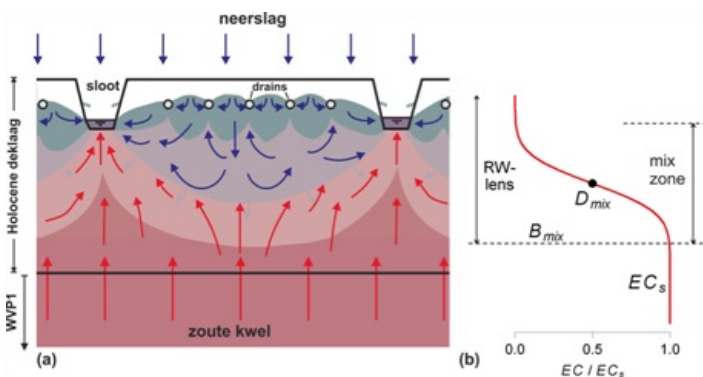
Illustratie van de theoretische benadering van Badon Ghijben van de ligging van de onderkant van een zoetwaterlens in zout grondwater (Bron: Oude Essink)

In de praktijk blijken er meer factoren in het spel te zijn dan enkel hydrostatisch evenwicht. De meest belangrijke hiervan zijn:

- Onder invloed van (zoute) kwel verplaatst de overgangszone zich naar boven, het Badon Ghijben-Herzbergprincipe werkt niet in kwelgebieden.
- Het grensvlak tussen zoet-zout grondwater is niet scherp zoals afgebeeld maar er wordt overgangszone aangetroffen van vaak enkele meters dik, als gevolg van mengprocessen.
- Kleilagen in de ondergrond belemmeren de infiltratie van regenwater en zullen altijd leiden tot een dunnere lens.
- Temporele variatie van de grondwaterstand (h) door sterk in de tijd variërende grondwateraanvulling en drainage.
- Drainage rooimt een significant deel van de potentiële grondwateraanvulling af.

Hoewel dit een theoretische benadering is die kan afwijken van de werkelijke situatie, kan deze BGH-relatie worden gebruikt om een eerste schatting te maken van de dikte van de zoetwaterlens in infiltratiegebieden. De zoetwaterlensen die zich ontwikkelen volgens het BGH-principe worden BGH-lenzen genoemd en komen in zout-Nederland in de infiltratiegebieden voor, veelal onder hoger gelegen zandlichamen zoals de duinen, strandwallen en kreekruggen.

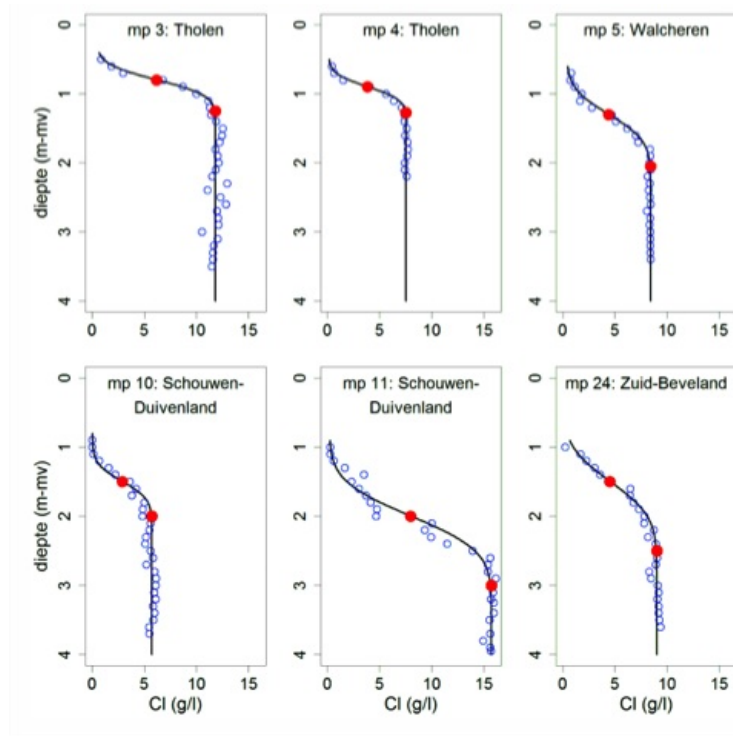
In gebieden met zoute kwel, het vanuit het eerste watervoerende pakket naar het oppervlak stromen van zout grondwater, worden vaak dunne regenwaterlensen aangetroffen. Namelijk, de opwaartse stroming belemmert de infiltratie van regenwater (zie onderstaande figuur). Deze lenzen ontwikkelen zich daarom in de slechtdoorlatende deklaag (klei, veen) en zijn daarom ook vaak niet dikker dan de deklaag. De regenwaterlensen die in zoute kwelgebieden worden aangetroffen worden voor het gemak aangeduid met RW-lenzen, om het onderscheid te kunnen maken met de zoetwaterlensen in infiltratiegebieden, de zogenaamde BGH-lenzen. In de zuidwestelijke delta (Zeeland, Z-Hollandse eilanden) en het noordelijke kustgebied (Friesland-Groningen) wordt het zoute grondwater zeer ondiep aangetroffen (< 5 m-mv; zie bovenstaande kaart) en is de Holocene deklaag slecht ontwikkeld. Dit leidt in de zoute kwelgebieden tot zeer dunne regenwaterlensen.



(a) Schematische weergave van een regenwaterlens in een zout 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). Bron: De Louw, 2013)

In een recente afgerond promotieonderzoek van De Louw (2013) is uitgebreid onderzocht wat de eigenschappen van deze RW-lenzen zijn (zie bovenstaande figuur) zoals dikte van de RW-lens, en het verloop van het zoutgehalte met de diepte, dikte van de mix-zone, en welke factoren deze eigenschappen mede bepalen. Tevens is de temporele dynamiek van deze lenzen onderzocht waarbij een link wordt gelegd met zoutgehaltes in de wortelzone. Uit het onderzoek kwam naar voren dat er nauwelijks zoet grondwater wordt aangetroffen in de RW-lenzen. Op de meeste locaties waar het zoutprofiel met de diepte is gemeten, was het bovenste grondwater vaak al brak. De mix-zone wordt binnen 1 m beneden maaiveld aangetroffen en vaak wordt op 1.5 tot 4 meter diepte heel zout grondwater aangetroffen, vergelijkbaar met 50-80% zeewater (zie de metingen onder). De mix-zone en de dynamiek ervan bepalen in belangrijke mate het zoutgehalte in de wortelzone en zijn daarom van groot belang voor de landbouw. Voor het perceel nabij Kerkwerpe zijn zoutgehaltes in de wortelzone gemeten tot 18 mS/cm. Zout migreert omhoog richting de wortelzone door capillaire opstijging van het bovenste grondwater in de regenwaterlens. Wanneer gedurende het zomerhalfjaar de grondwaterstand daalt, zal het

water dat via de capillaire poriën opstijgt van steeds grotere diepte uit de regenwaterlens komen en dus steeds zouter zijn.



Metingen (blauwe rondjes) van het zoutgehalte met de diepte van enkele RW-lenzen in Zeeland. De rode stippen geven het midden van de mix-zone weer (D_{mix}) en de basis van de mix-zone (B_{mix}) (Bron: De Louw et al., 2011).

De dimensies van de regenwaterlens in kwelgebieden worden dus niet bepaald door het Badon-Herzberg principe, maar primair door de grootte van de kwelflux, het neerslagoverschot, en de diepte van de drainagemiddelen. Onder kwelomstandigheden blijft de regenwaterlens altijd beperkt tot de deklaag door de permanente opwaartse stroming vanuit de onderliggende zandlaag (aquifer).

Veldproeven in Zeeland (De Louw, 2013) en Friesland-Groningen (Velstra et al., 2011) laten zien dat de drains een sterk effect hebben op de transportroutes van opgelost zout. Onder 'natte' omstandigheden met de grondwaterspiegel boven de drains treedt *upconing* van zoute kwel naar de drains op die dan een mengsel van kwel- en neerslagwater afvoeren. Het zoutgehalte van het drainagewater en dynamiek daarvan wordt sterk bepaald door de karakteristieken van de regenwaterlens in combinatie met fluctuerende grondwaterstand en dagelijks variërende neerslag en verdamping. Tijdens regenbuien stijgt de grondwaterstand snel, neemt de drainageafvoer snel toe en daalt direct het zoutgehalte van het drainagewater. Door de stijging van de grondwaterstand wordt dieper en zouter water van de regenwaterlens gemobiliseerd en afgevoerd. Dit gaat gepaard met lage zoutgehalten door sterke verdunning van de grote hoeveelheid neerslag en ondiep grondwater dat ook tot afvoer komt. Na de regenbuien, als de drainageafvoer weer afneemt, stijgt het zoutgehalte van het drainagewater gestaag. Drainageafvoer bestaat dus uit continu variërende verhoudingen van grondwater van verschillende dieptes en zoutgehalten, en dit veroorzaakt het sterk dynamische karakter van het zoutgehalte van drainagewater.

TYPOLOGIE EN MOGELIJKE BEHEERMAATREGELEN

Regenwaterlenzen komen overal voor waar zich zout grondwater bevindt. Grosso modo kunnen drie verschillende typen worden onderscheiden afhankelijk van de omstandigheden waaronder ze zijn gevormd:

- **BGH-lens** — Infiltratiegebieden. Hooggelegen goed doorlatende bodems, zoals de kustduinen en kreekruggen. Hier komen relatief dikke zoetwaterlenzen voor van het Badon Ghijben–Herzberg (BGH) type voor.
- **RW-lens - Rijnlands type** — Kwelgebieden. Diepe polders met een dikke deklaag, met vaak de slechtst doorlatende laag onderin de deklaag (Basisveen onder Westland afzettingen). Onder deze omstandigheden wordt de zoute kwel op diepere lagen richting het oppervlaktewatersysteem afgebogen. Op plekken met zoute kwel via zandbanen of wellen kunnen juist wel zeer ondiepe RW-lenzen worden aangetroffen (De Louw et al., 2010)
- **RW-lens - Zeeuws type** — Kwelgebieden. Laaggelegen polders met een dunne deklaag en ondiep zeer zout grondwater. Onder deze omstandigheden ontwikkelt zich een dunne regenwaterlens die vooral bepaald wordt door drainagediepte, grondwateraanvulling en kwelflux en kan het zoute grondwater tot in de wortelzone doordringen.

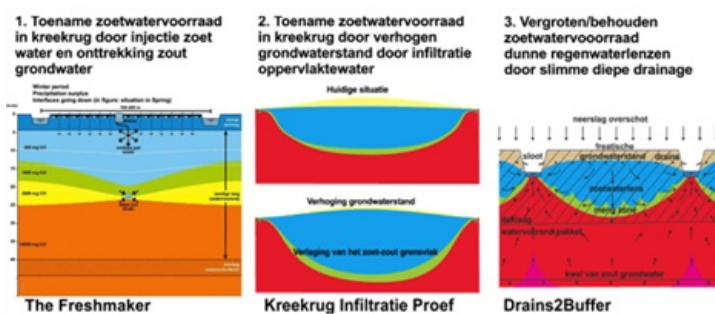
Van deze drie hoofdtypen regenwaterlenzen is vooral het Zeeuwse type het meest kwetsbaar voor klimaatverandering. Door de ondiepe ligging van deze RW-lenzen is de dikte sterk afhankelijk van het neerslag- en verdampingoverschot. Bij een veranderend klimaat waarbij het in de winter natter wordt en in de zomer droger (minder neerslag, meer verdamping) zal de RW-lens krimpen. Door toenemende verdamping in de zomer in combinatie met minder neerslag zal de lens in de zomer dunner worden terwijl een eventueel groter neerslagoverschot in de winter dit niet kan compenseren. Dit winterwater wordt (te) efficiënt afgevoerd en komt daarmee niet ten goede aan de groei van de regenwaterlenzen. Zoutgehalten van de RW-lens nemen daardoor toe waardoor de kans groter wordt dat ook de wortelzone zouter wordt

(door capillaire opstijging van het zoute RW-lens water) met in potentie toename van zoutschade aan gewassen. Daarnaast zal door zeespiegelstijgingen de zoute kwel flux toenemen waarmee de RW-lenzen verder onder druk komen. Dit geldt echter alleen voor een smalle zone langs de kust (1-5 km) waar zeespiegelstijging een significant effect heeft op het grondwatersysteem.

Het Rijnland-type is dik genoeg om ook onder de momenteel beschouwde klimaatscenario's te blijven functioneren. De BGH-lens kan mogelijk wel negatieve gevolgen ondervinden van klimaatverandering. Ten eerste zullen kustnabije BGH-lenzen kunnen krimpen door zeespiegelstijging. Ten tweede kan een afname van het jaarlijks neerslagoverschot leiden tot gemiddeld lagere grondwaterstanden waardoor de BGH-lens kan krimpen. Bij een toename van het jaarlijkse neerslagoverschot en daardoor hogere grondwaterstanden zou de BGH-lens zelfs kunnen groeien. In tegenstelling tot RW-lenzen is de dikte van BGH-lenzen minder afhankelijk van de variatie van het neerslagoverschot door het jaar heen.

Voor een goed beheer van zoetwatervoorraden in regio's waar het zoute grondwater op veel locaties ondiep wordt aangetroffen (zie bovenstaande kaart) zijn meerdere opties beschikbaar:

- **Een aanpassing van het drainagesysteem.** Met regelbare drainage waarbij de drains dieper liggen dan traditioneel maar het drainagepeil gehandhaafd blijft (dus er wordt niet intensiever gedraineerd) kan de lens van het RW-type toenemen in dikte. Tijdens regenbuien wordt dieper en zouter grondwater afgevoerd waardoor de lens kan groeien naar een nieuw evenwicht. Een vuistregel is dat de regenwaterlens kan groeien met het aantal centimeters dat de drainage wordt verdiept. D_{mix} wordt door deze maatregel verlaagd wat leidt tot lagere zoutgehaltenes van het bovenste grondwater waardoor minder zout grondwater via capillaire opstijging in de zomer de wortelzone kan bereiken. De kans op zoutschade aan gewassen kan hiermee worden verkleind. Deze maatregel wordt drains2buffer genoemd en wordt momenteel getest in het veld op Schouwen-Duiveland binnen het project Go-Fresh. De lens kan nog meer groeien door met regelbare drainage gemiddeld hogere grondwaterstanden te creëren.
- **Infiltratie in kreekkruggen.** Door actief water te infiltreren in hoger gelegen kreekkruggen kunnen bestaande BGH-lenzen worden vergroot zodat deze zoetwatervoorraden voor beregening kunnen worden gebruikt. Echter, door de opwaartse kracht van het omringende zoute grondwater zal tevens de grondwaterstand permanent moeten worden verhoogd om te voorkomen dat de lens gaat opdrijven (zie BGH-principe boven). Deze maatregel wordt momenteel op Walcheren in het veld getest binnen het project Go-Fresh (Oude Essink et al., 2014). Een alternatief is de combinatie van zoetwater infiltratie met het onder de lens onttrekken van zout grondwater om de groeiende lens op zijn plek te houden. Dit principe wordt de Freshmaker genoemd en wordt ook op Walcheren binnen het project Go-Fresh getest (Zuurbier et al., 2014). Eerste resultaten van beide Go-Fresh maatregelen laten veelbelovende resultaten zien (www.go-fresh.info).
- **Zoetwateraanvoer van elders.** Veel, maar zeker niet alle, gebieden met dunne regenwaterlenzen liggen nabij de kustduinen met daar voorkomende BGH-lenzen. Een deel van het daaruit stromende zoetwateroverschot, dat nu vaak onbenut mengt met het regionale oppervlaktewater, kan worden afgetapt en als irrigatiewater worden gebruikt. Het scheiden van zoete sloten van zoute sloten is daarbij erg belangrijk.
- **Peilbeheer.** Het oppervlaktewaterpeil fungeert als drainagebasis en bepaalt dus mede de verdeling van het neerslagoverschot tussen laterale drainage en verticale infiltratie. Hogere peilen, bijvoorbeeld gedurende de winter, leiden tot meer infiltratie en dus dikkere regenwaterlenzen.
- **Kwelvoorziening.** Met het verlagen van de stijghoogte door actieve afvoer van zout grondwater via verticale kwelbuizen kunnen negatieve effecten van zeespiegelstijging op nabijgelegen BGH-lenzen worden gecompenseerd. Bij optimale afstemming van de kwelvoorziening is het zelfs mogelijk deze BGH-lenzen te laten groeien. Een voor de landbouw belangrijke zoetwaterbel bij Perkpolder wordt op dit moment op deze manier beschermd voor negatieve gevolgen door de ontwikkeling van een nieuw getijdegebied.



De drie Go-Fresh maatregelen waarvan de effectiviteit binnen het KvK-project Go-Fresh in het veld worden getest.

In het kader van het KvK-project [Freshwater Options Optimizer](#) zijn landelijke geschiktheidskaarten gemaakt waarin op landelijk niveau (o.b.v. landelijke data) staat aangegeven welke gebieden geschikt zijn voor het toepassen van de drie Go-Fresh maatregelen (van Bakel et al., 2014).

KOSTEN EN BATEN

Het is niet eenvoudig op voorhand te zeggen wat de kosten en baten zijn van bovengenoemde maatregelen. Ten eerste is door het experimentele stadium waarin de verscheidene maatregelen zich bevinden niet duidelijk wat de kosten zijn. Ten tweede is door markteffecten niet duidelijk wat de baten zijn. In 'droge' jaren waarin door droogte relatief veel zoutstress optreedt en een lagere opbrengst geogst wordt, kan juist door de slechte oogst de prijs hoog zijn en de totale financiële opbrengst feitelijk hoger dan gedurende een 'normaal' jaar.

GOVERNANCE

De fragiliteit van de regenwaterlenzen van het Zeeuwse type vereisen een fijnzinnig lokaal toegespitst waterbeheer. In de praktijk wordt dit door de betrokken agrariërs ook als dusdanig beheerd. Van de genoemde beheersopties is met name de optimalisatie van BG-lenzen onder kreekkruggen afhankelijk van een goede regionale (bestuurlijke) afstemming, aangezien waterbeheer op de ene locatie (kreekkruggen) in dienst wordt gesteld van die op een andere locatie (zoute kwelgebieden). Het waterschap speelt hierbij een prominente rol. Het waterhouderij-concept kan daarbij van dienst zijn.

PRAKTIJKERVARINGEN EN LOPENDE ONDERZOEKEN

Alle agrariërs in de Zeeuwse en Noord-Nederlandse polders in zoute kwelgebieden hebben praktijkervaringen met regenwaterlenzen. Onderzoekservaringen zijn met name opgedaan in Zeeland ([de Louw et al., 2011](#), [de Louw et al., 2013](#), [Pauw et al., 2015](#), [Zuurbier et al., 2013](#)), Rijnland ([de Louw et al., 2010](#)) en Noord-Nederland ([Velstra et al., 2011](#)). In Zeeland zijn binnen het KvK-project [Go-Fresh](#) in 2012 veldexperimenten opgestart met zowel peilgestuurde diepere drainage om RW-lenzen te vergroten (drains2buffer), als met optimalisatie van het vergroten van zoetwatervoorraden onder kreekkruggen (kreekruginfiltratie, freshmaker). In Perkpolder is een kwelvoorziening ingericht waarmee sinds juni 2015 een zoetwaterbel wordt beschermd tegen de negatieve gevolgen van een nieuw getijdegebied. Binnen het FRESHEM-project (FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic) brengen Deltares, TNO en BGR de dikte van alle type regenwaterlenzen in de Zeeuwse ondergrond in kaart met behulp van elektromagnetische metingen vanuit een helikopter.

www.cliwat.eu - 'Climate and Water'. Een EU InterReg project waarbinnen regenwaterlenzenonderzoek door Deltares is uitgevoerd. Zeeland is een CLIWAT pilot area.

www.climateproofareas.com - 'Climate Proof Areas'. Een EU InterReg project waarbinnen verschillende klimaatadaptatieprojecten lopen in Schouwen-Duiveland, waaronder het robuust maken van regenwaterlenzen.

aequator.nl/waterhouderij - Project gericht op het vergroten van de zelfvoorzienendheid door neerslagoverschotten in de winter te bufferen voor gebruik 's zomers.

KENNISLEEMTEN

De primaire *controls* op de vorming en dikte van de regenwaterlenzen zijn door de diverse meet- en modelleerstudies inmiddels redelijk bekend. Overgebleven kennisleemten zijn vooral:

- **Procesdetails**

Uit veldobservaties ([Velstra et al., 2011](#), [de Louw et al., 2011](#), [de Louw et al., 2013](#)) blijkt dat de stromingsprocessen in de onverzadigde zone zoals capillaire opstijging en rondom drains complexer is dan eerder gedacht. Deze processen hebben relevantie voor het zoutgehalte in de wortelzone en dus voor eventuele zoutschade, en de zoutvracht naar het oppervlaktewater. Er is hierbij behoefte aan een beter begrip van deze processen, met name in kwantitatieve zin, en met name de interactie tussen de RW-lens en zoutgehaltes in de wortelzone.

- **Effectiviteit maatregelen**

De voorgenomen maatregelen ter vergroting van BG-lenzen en RW-lenzen zijn grotendeels gebaseerd op inzichten uit kleinschalige veldexperimenten en modelleerstudies. De veldexperimenten zijn nog niet afgerond. Een uitdaging is de opschaling van deze lokale maatregelen. Ook zijn er nog schaalproblemen zodat de zoutwaterfluxen vanuit grootschalige grondwatermodellen niet zonder meer vertaald kunnen worden naar kwelfluxen op perceelschaal.

- **Kosten-baten maatregelen**

Het is nog niet goed bekend wat de kosten-baten zijn van bovengenoemde maatregelen bij zowel toepassing op perceelsniveau en bij regionale toepassing

LITERATUUR EN LINKS

- Badon Ghijben, W., 1888-1889. [Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam](#). Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 5, 8-22.
- Eeman, S., Leijnse, A., Raats, P. A. C., & van der Zee, S. E. A. T. M., 2011. [Analysis of the thickness of a fresh water lens and of the transition zone between this lens and upwelling saline water](#). Advances in Water Resources, 34 (2), 291-302. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.12.001
- Herzberg, A., 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. J. Gasbeleucht. Verw. Beleuchtungsarten Wasserversorg., 44, 815-819, 842-844.
- De Louw, P.G.B., 2013. [Zoute kwel in delta's. Preferente kwel via wellen en interacties tussen dunne regenwaterlenzen en zoute kwel](#). Academisch proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam, ISBN/EAN 9789461085429.
- de Louw, P. G. B., 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. DOI: 10.5194/hess-15-3659-2011
- de Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Stuyfzand, P. J., & van der Zee, S. E. A. T. M., 2010. [Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands](#). Journal of Hydrology, 394 (3-4), 494-506. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.10.009
- 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.

- De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Eeman, S., Van Baaren, E.S., Vermue, E., Delsman, J.R., Pauw, P.S., Siemon, B., Gunnink, J.L., Post, V.E.A., 2015, *Dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden*, *Landschap*, 32, 5-15.
- Hoogvliet et al., 2014. *Methode voor het selecteren van lokale zoetwateroplossingen en het afwegen van hun effecten Fresh Water Options Optimizer*. Stowa rapportnummer 2014-43. KvK rapportnummer KvK141/2014. ISBN 978.90.5773.650.6
- Maas, K., 2007. *Influence of climate change on a Ghijben–Herzberg lens*. *Journal of Hydrology*, 347 (1–2), 223–228.
- Oude Essink, G.H.P., van Baaren, E.S., Zuurbier, K.G., Velstra, J., Veraart, J., Brouwer, W., Faneca Sánchez, M., Pauw, P.S., de Louw, P.G.B., Vreke, J., Schoevers, M., 2014. *GO-FRESH: Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening*, KvK 151/2014, ISBN EAN 978-94-92100-12-2, 84 p.
- Pauw, P.S., Van Baaren, E.S., Visser, M. De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., 2015, *Increasing a freshwater lens below a creek ridge using a controlled artificial recharge and drainage system: a case study in the Netherlands*, *Hydrogeology Journal*. doi: 10.1007/s10040-015-1264-z
- Pauw, P. (2015). *Field and Model Investigations of Freshwater Lenses in Coastal Aquifers*. Academisch proefschrift, Wageningen University.
- van Bakel, de Louw, Stuyt, Tolk, Velstra, Hoogvliet, 2014. *Methode voor het bepalen van de potentie voor het toepassen van lokale zoetwateroplossingen Fresh Water Options Optimizer – Fase 1*. Stowa rapportnr. 2014-16, KvK rapportnr. KvK118/2014.
- Velstra, J., Groen, J., & de Jong, K., 2011. *Observations of Salinity Patterns in Shallow Groundwater and Drainage Water From Agricultural Land in the Northern Part of The Netherlands*. *Irrigation and Drainage*, 60, 51–58.
- Zuurbier, K., Bakker, M., Zaadnoordijk, W., Stuyfzand, P., 2013. *Identification of potential sites for aquifer storage and recovery (ASR) in coastal areas using ASR performance estimation methods*. *Hydrogeology Journal*, 21(6): 1373-1383.
- Zuurbier, K.G., Zaadnoordijk, W.J., Stuyfzand, P.J., 2014. In Press. *How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal ASR systems: a field and modeling study*. *Journal of Hydrology*.

zoetzout.deltares.nl - Site van het Deltares-team dat zich met zoet en zout grondwater in het kustgebied bezig houdt.

www.levenmetzoutwater.nl - Site van Acacia Water waarin bevindingen van het project Leven met Zoutwater (inventarisatie verzilting Nederland) staan vermeld.

Deze Deltafact is opgesteld door Deltares en Alterra, juni 2014, laatste update september 2017.

Auteurs: Perry de Louw (Deltares), Patrick Bogaart (Alterra)

DISCLAIMER

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.