



Dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden

In zoute kwelgebieden zijn dunne regenwaterlenzen van groot belang voor de landbouw omdat ze vaak de enige zoetwaterbron zijn en voorkomen dat (te) zout kwelwater de wortelzone bereikt. Veldonderzoek in Zeeland heeft voor het eerst in beeld gebracht hoe deze lenzen er precies uitzien, hoe ze veranderen in de tijd en welke processen daarbij een rol spelen. De lenzen blijken erg kwetsbaar voor klimaatverandering. De opgedane systeembekendheid maakt het mogelijk hiervoor mitigerende maatregelen te formuleren.

Meer dan 30% van de wereldbevolking woont in kustgebieden (tot 70 kilometer vanaf de kustlijn) en is afhankelijk van zoete grondwaterreserves voor drinkwater, landbouw en industriële doeleinden. In veel kustgebieden is het grondwater echter 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 leidt tot verzilting van het oppervlaktewater, het ondiepe grondwater en het bodemwater in de wortelzone. Zo ligt Nederland voor een kwart onder zeeniveau en bedreigt zoute kwel in toenemende mate de zoetwatervoorziening. Het ligt in de verwachting dat door de voorspelde klimaatverandering en toekomstige stijging van de zeespiegel, de zoute kwel in laag-Nederland zal toenemen en de beschikbaarheid van zoet water zal afnemen (Oude Essink et al., 2010).

Dat zout grondwater in Nederland voorkomt heeft alles te maken met de paleogeografische ontwikkeling gedurende het Holoceen, zie figuur 1a-d (Post & Kooi, 2003; Vos et al., 2011; Delsman et al., 2014). Tijdens transgressies, perioden waarin de invloed van de zee in een kustgebied toenam, kon het zwaardere zeewater gemakkelijk de bodem infiltreren en werd het aanwezige lichtere zoete grondwater verdrongen. De gebieden die recentelijk nog onder invloed van zee stonden zoals Zeeland en het noordelijke kustgebied (figuur 1d) zijn de zoutste gebieden van Nederland. Daar wordt het zoute grond-

water vaak op minder dan vijf meter diepte aangetroffen (figuur 1e). Vanaf 800 AD (figuur 1d) begon de mens droogvallende stukken land in te dijken en zo ontstonden de eerste polders van Nederland. Door de lage ligging onder zeeniveau stroomde het aanwezige zoute grondwater als kwel weer naar het oppervlak.

In deze zoute kwelgebieden is zoet water vaak alleen maar aanwezig in de vorm van dunne regenwaterlenzen die drijven op het zoute grondwater. De regenwaterlenzen voorkomen dat (te) zout kwelwater de wortelzone bereikt via capillaire opstijging en zijn daarom van groot belang voor de landbouw. Hoe de lenzen er precies uit zien en variëren in de tijd was niet bekend en is de laatste jaren in detail onderzocht. Dit veldonderzoek vond plaats in Zeeland en was onderdeel van het promotieonderzoek van De Louw (2013) met de titel *Zoute kwel in delta's*. De belangrijkste resultaten worden in dit artikel gepresenteerd. Op basis van verschillende typen veldmetingen worden de karakteristieken, de ruimtelijke variatie en het dynamische gedrag van deze lenzen besproken. Door ons toegenomen inzicht in de werking van deze kleinschalige systemen is duidelijk geworden hoe kwetsbaar ze zijn voor klimaatverandering. Tevens bespreken we enkele kansrijke mitigerende maatregelen die effectief kunnen bijdragen aan een klimaatrobuuste regionale zoetwatervoorziening.

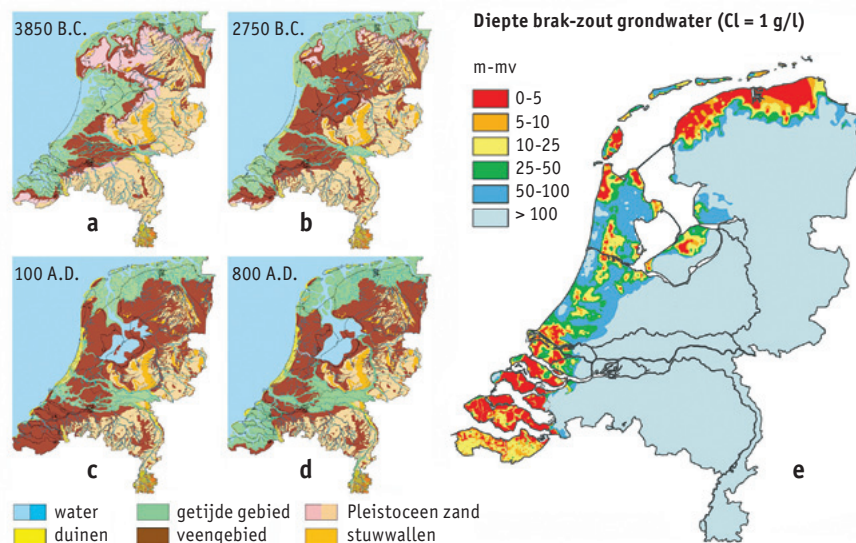
Meetmethoden

De karakteristieken van regenwaterlenzen konden nauwkeurig worden verkregen uit (x) handmetingen

PERRY DE LOUW,
GUALBERT OUDE
ESSINK, SARA EEMAN,
ESTHER VAN BAAREN,
ESTHER VERMUE,
JOOST DELSMAN,
PIETER PAUW,
BERNHARD SIEMON,
JAN GUNNINK &
VINCENT POST

Dr. P.G.B. de Louw Deltares, Bodem en grondwater, postbus 85467, 3508 AL Utrecht. Perry.delouw@deltares.nl
Dr. Ir. G.H.P. Oude Essink Deltares, Bodem en grondwater en Universiteit Utrecht, Fysische Geografie
S. Eeman MSc Wageningen UR, Leerstoelgroep Bodemfysica en Landmanagement
Ir. E.S. van Baaren Deltares, Bodem en grondwater
E. Vermue MSc Wageningen UR, Leerstoelgroep Bodemfysica en Landmanagement
Drs. J.R. Delsman Deltares, Bodem en grondwater
P.S. Pauw MSc Deltares, Bodem en grondwater en Wageningen UR, Leerstoelgroep Bodemfysica en Landmanagement
Dr. B. Siemon Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Germany
Drs. J. Gunnink TNO Geologische Dienst Nederland
Dr. V.E.A. Post Flinders University, National Centre for Groundwater Research and Training, School of the Environment, Australia

Foto **Aat Barendregt** inlaag (strook land tussen zeedijk en reservedijk) op Schouwen



Figuur 1a-d de paleogeografische ontwikkeling van Nederland in vier fasen (naar Vos *et al.*, 2011). **Figuur 1e** de diepte van het zoet-zout grensvlak als gevolg van de Holocene transgressies (gegevens uit Dino-loket).

Figure 1a-d the paleogeographical development of the Netherlands in four phases (after Vos *et al.*, 2011). **Figure 1e** the depth of the fresh-saline interface (Cl = 1 g l⁻¹) of groundwater from Holocene origin (data from: www2.dinoloket.nl/nl/DINOMap.html).

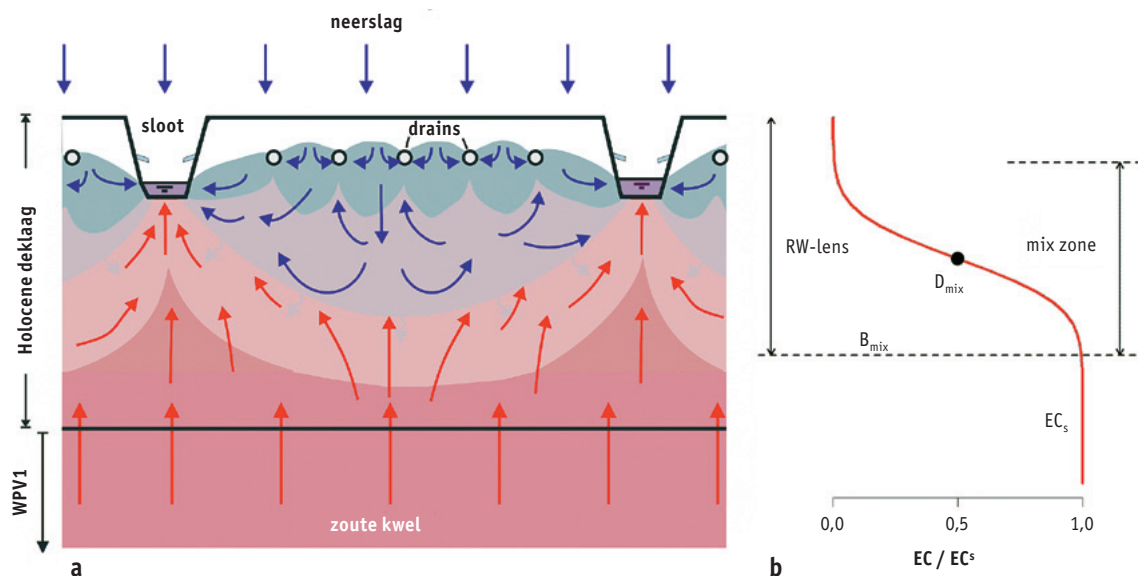
tot een diepte van vier meter met de TEC-prikstok van temperatuur (T) en elektrische geleidbaarheid (EC), (2) geleidbaarheidssonderingen (ECPT: *electrical cone penetration test*) tot 25 meter diepte, en (3) bemonstering en analyse van grond- en bodemwater. Voor het in beeld brengen van de ruimtelijke variatie binnen een landbouwperceel is verder gebruikt gemaakt van CVES (continue verticale elektrische sonderingen) en elektromagnetische metingen (EM31). Het was zelfs mogelijk om de karakteristieken van regenwaterlenzen voor een groot deel van het eiland Schouwen-Duivenland te karteren door gebruik te maken van elektromagnetische metingen vanuit een helikopter (HEM: *helicopter electromagnetic measurement*). Deze HEM-metingen zijn in het kader van het Interreg-project CLIWAT (cliwat.eu) in samenwerking met de geologische dienst van Duitsland (BGR) en Nederland (TNO) uitgevoerd. Vervolgens zijn op basis van deze metingen twee landbouwpercelen op Schouwen-Duivenland geselecteerd

(nabij Renesse en Kerkwerpe) om de dynamiek van de lenzen te onderzoeken. Hier is over een periode van twee 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 zoals SEAWAT (Langevin *et al.*, 2007) zijn gebruikt om de processen te analyseren die de karakteristieken van de regenwaterlenzen en hun dynamisch gedrag bepalen. Zowel de elektrische geleidbaarheid (EC) als de chlorideconcentratie (Cl) worden vaak gebruikt om het zoutgehalte van water te duiden. Beide parameters zijn in het veld gemeten en worden in dit artikel door elkaar gebruikt. De EC-meting is veel eenvoudiger en sneller in het veld uit te voeren dan het bepalen van chloride. Op basis van 79 veldmetingen is de volgende relatie ($R^2=0.96$) tussen EC en Cl vastgesteld: $Cl \text{ (g/l)} = 0,36 \cdot EC \text{ (mS/cm)} - 0,45$ (toepasbaar voor $EC > 2 \text{ mS/cm}$).

Resultaten en discussie

Karakteristieken en ruimtelijke variatie

Figuren 2 en 3a tonen de belangrijkste karakteristieken van de dunne regenwaterlenzen op basis van de TEC-prikstokmetingen. Deze veldmetingen zijn op 30 verschillende landbouwpercelen met zoute kwel uitgevoerd en laten een geleidelijke overgangszone in zoutgehaltes (mix- of mengzone) zien tussen geïnfilteerd regenwater en opwaarts stromend zout kwelwater (Figuur 2 en 3a). Het midden van deze mengzone wordt D_{mix} genoemd en zit op een zeer geringe diepte, gemiddeld 1,7 meter beneden maaiveld (Figuur 2b). In bijna alle onderzochte regenwaterlenzen in de zoute kwelgebieden van Zeeland is geen zoet grondwater aangetroffen (zoet = Cl < 300 mg l⁻¹). Op basis van deze metingen is de dunne regenwaterlens gedefinieerd als het volledige grondwaterlichaam



Figuur 2a schematische weergave van een regenwaterlens in een gebied met zoute kwel.

Figuur 2b het zoutgehalte van het grondwater in de mengzone van de regenwaterlens. D_{mix} is het midden van de mengzone waar het zoutgehalte (EC) de helft van het zoutgehalte van het kwelwater (EC_s) is. B_{mix} is de basis van de mengzone waar het zoutgehalte gelijk is aan dat van het zoute kwelwater (EC_s). Naar De Louw *et al.* (2013).

Figure 2a schematic cross-section of a rainwater lens in an area with saline seepage.

Figure 2b the salinity of groundwater in the mixing zone of the rainwater lens. The depth of the centre of the mixing zone (D_{mix}) is at the point where the salinity (EC) is 50% of the seepage water salinity (EC_s). B_{mix} is the base of the mixing zone where the salinity equals EC_s. After De Louw *et al.* (2013).

van grondwaterstand tot aan de basis van de mengzone (B_{mix} , Figuur 2b). Met deze definitie is de regenwaterlens dus geen pure zoetwaterlens en variëren zoutgehaltes binnen de regenwaterlens zowel in ruimte, diepte, als in tijd. B_{mix} is op een gemiddelde diepte van 2,8 meter beneden maaiveld aangetroffen. ECPT-metingen laten zien dat op dieptes groter dan B_{mix} het zoutgehalte constant met de diepte blijft tot minimaal een diepte van 25 meter (= diepte van de ECPT-metingen), zie figuur 3b.

Voor een landbouwperceel op Schouwen-Duivenland nabij Renesse, dat zowel een zout kwelgebied als een deel van een hoger gelegen kreekkrug doorsnijdt, is de ruimtelijke variatie van de dikte van de regenwaterlens in beeld gebracht met behulp de TEC-prikstok, ECPT en CVES (figuur 4). Een kreekkrug is een hoger gelegen zandlichaam in een voormalig getijdgebied dat door inklinking van het omringende klei en veen hoger in

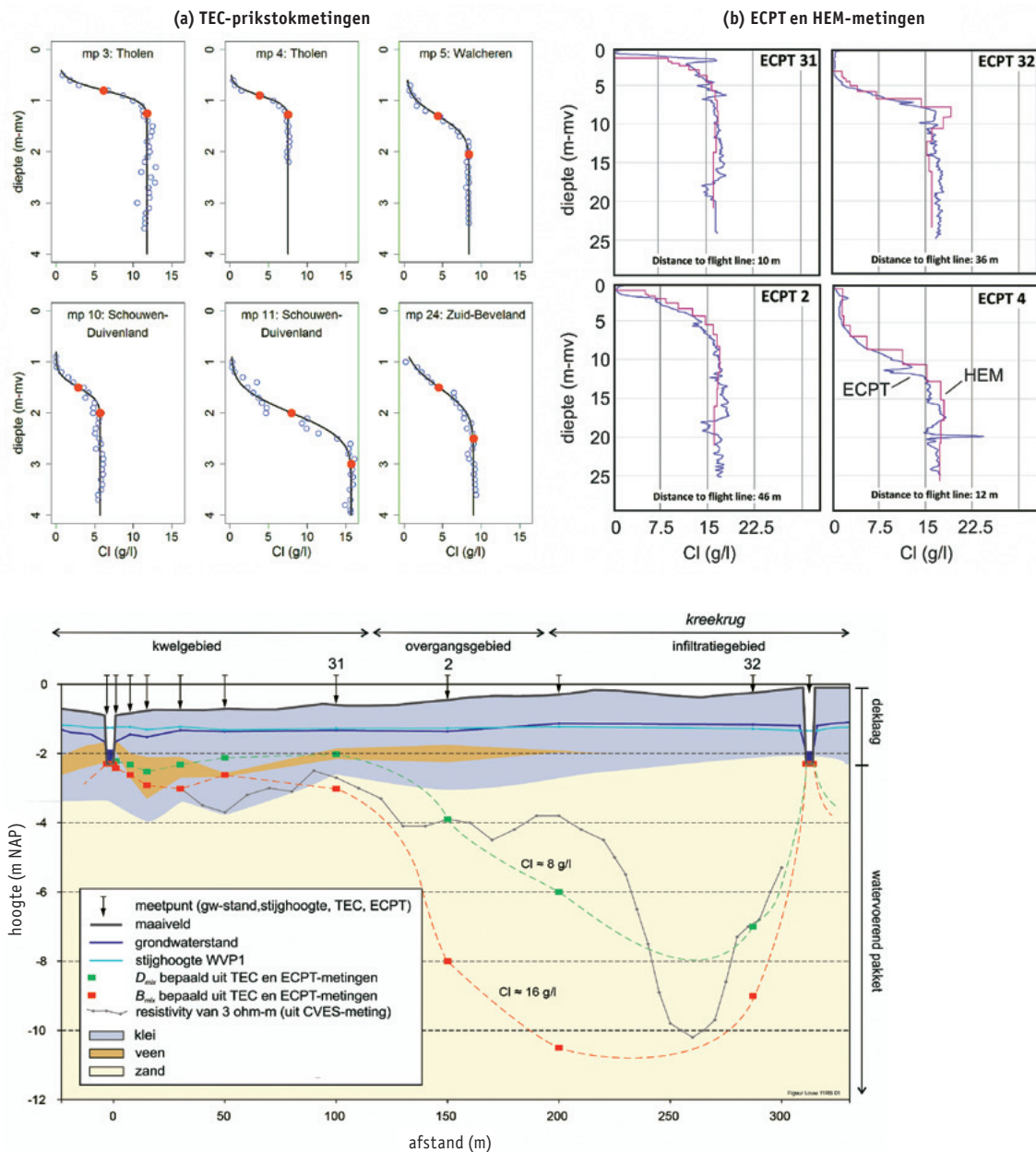
het landschap is komen te liggen. Tevens zijn stijghoogtemetingen uitgevoerd op 1,5 meter diepte (freatische grondwaterstand) en op 4 meter diepte in het watervoerend pakket onder de slecht doorlatende deklaag (stijghoogte) over een periode van twee jaar. Voor het laag gelegen kwelgebied wordt een permanente hogere stijghoogte gemeten dan de freatische grondwaterstand. Dit betekent dat hier een permanente kwel vanuit het eerste watervoerende pakket de deklaag in stroomt (figuur 4). De metingen laten ter plaatse een zeer dunne regenwaterlens zien met D_{mix} op ongeveer 1,5 meter beneden maaiveld. B_{mix} bevindt zich binnen 2,5 meter onder maaiveld. Hier wordt een chloridegehalte gemeten van 16 g/l, een zoutgehalte dat bijna vergelijkbaar is met dat van zeewater (Cl = 19 g/l). Het lage slootpeil leidt tot zeer hoge kwelfluxen in de sloot, waardoor onder de slootbodem alleen zout kwelwater zonder bijmenging van neerslag wordt aangetroffen (de mengzone is hier afwezig).

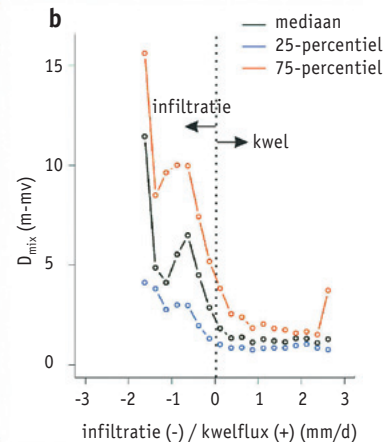
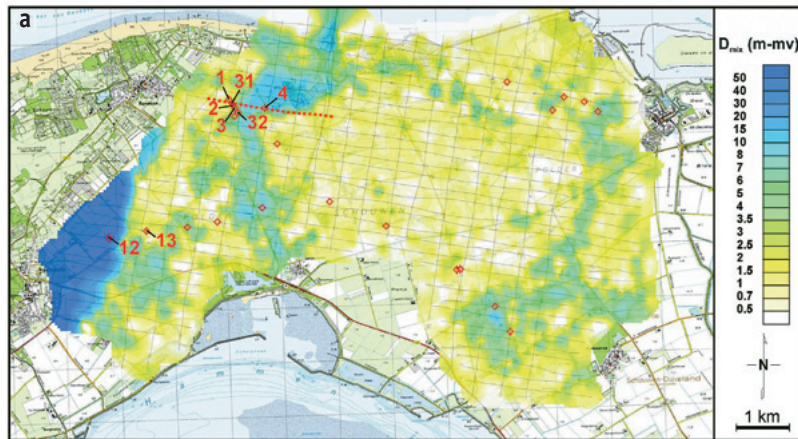
Figuur 3 zoutgehalte van het grondwater als functie van de diepte (m-maaiveld), a: gemeten met de TEC-prikstok (de blauwe bolletjes geven de metingen aan en de rode stippen het midden (D_{mix}) en basis (B_{mix}) van de mengzone) en b: gemeten met behulp van geleidbaarheidssonderingen (ECPT) en helikopter elektromagnetische metingen (HEM). Naar De Louw *et al.* (2011).

Figure 3 salinity of groundwater as a function of depth below soil surface, a: measured with the TEC-probe (the blue circles indicate the measurements and the red dots indicate the centre (D_{mix}) and base (B_{mix}) of the mixing zone) and b: measured with electrical cone penetration tests (ECPT) and helicopter electromagnetic (HEM) measurements. After De Louw *et al.* (2011).

Figuur 4 dwarsdoorsnede van een landbouwperceel nabij Renesse met zowel kwel als infiltratie (op kreekkrug). In de dwarsdoorsnede zijn metingen verwerkt van de lithologische opbouw, grondwaterstand (op 1,5 meter diepte), stijghoogte (op 4 meter diepte) en de dikte van regenwaterlens gekarakteriseerd door D_{mix} en B_{mix} . De nummers 2, 31 en 32 verwijzen naar de ECPT-metingen weergegeven in figuur 3b. Naar De Louw *et al.* (2011).

Figure 4 cross-section of an agricultural field nearby Renesse showing a seepage and an infiltration situation. The cross-section shows the lithology, measured hydraulic heads at 1.5 and 4 meter depth and measured rainwater lens thickness characterized by D_{mix} and B_{mix} . The numbers 2, 31, and 32 refer to the ECPT-measurements presented in figure 3b. After De Louw *et al.* (2011).





In de richting van het kwelgebied naar de hoger gelegen kreekrug slaat de permanente kwel om naar tijdelijk kwel (overgangszone) en uiteindelijk naar permanente infiltratie (figuur 4). In het infiltratiegebied, waar regenwater dus het eerste watervoerende pakket in stroomt, wordt een iets hogere freatische grondwaterstand (0,1-0,2 meter) aangetroffen dan de stijghoogte op 4 meter diepte. Dit stijghoogteverschil – hoe gering ook – heeft tot veel dikkere regenwaterlens geleid dan in het kwelgebied, met een D_{mix} op ongeveer 7 meter diepte en B_{mix} op 10 meter onder maaiveld (figuur 4). De metingen tonen aan dat op zeer korte afstand de dikte van regenwaterlens sterk kan variëren als gevolg van verschillen in verticale flux (kwel versus infiltratie). Het mechanisme van lensvorming is voor beide type hydrologische situaties dan ook zeer verschillend (zie volgende paragraaf).

Op Schouwen-Duiveland zijn voor een groot gebied (56 km²) met een helikopter in twee dagen tijd 84.300 puntmetingen (HEM-metingen) uitgevoerd om het verloop van het zoutgehalte met de diepte te bepalen (Siemon et al., 2011). De HEM-metingen benaderen zeer nauwkeu-

rig het verloop van de geleidbaarheid van de ondergrond zoals die is bepaald met de geleidbaarheidsonderingen (ECPTs), zie figuur 3b. Hierdoor is het mogelijk de D_{mix} van elke HEM-meting te bepalen. Door interpolatie kon een gebiedsdekkende kaart van D_{mix} worden gemaakt (figuur 5a). In het grootste deel van het gebied wordt D_{mix} zeer ondiep (minder dan 2,5 m-mv) aangetroffen. Dit zijn de zoute kwelgebieden. Onder de hoger gelegen kreekruggen bevinden zich zoetwaterlens van 5 tot 20 meter dikte. Voor alle 84.300 locaties waar D_{mix} in het veld met behulp van HEM is bepaald, is de bijbehorende verticale flux (kwel-infiltratie) afgeleid uit het regionale grondwatermodel van Zeeland (Van Baaren et al., 2015). In Figuur 5b staat het resultaat van deze analyse waarin duidelijk zichtbaar is dat D_{mix} zeer ondiep (binnen 2,5 m-mv) wordt aangetroffen in gebieden met kwel. Wanneer kwel omslaat naar infiltratie neemt de dikte van de zoetwaterlens zeer sterk toe. De sterke toename in lensdikte van kwel naar infiltratie weerspiegelt wederom het verschil in het mechanisme van lensvorming dat hieronder verder wordt toegelicht.

Figuur 5a de dikte van de regenwaterlens gekarakteriseerd door D_{mix} . De kaart is gebaseerd op een interpolatie van 84.300 HEM-metingen. De grijze lijnen geven de vlieglijnen weer. De rode stippen geven de locatie weer van de ECPT-metingen waarmee de HEM-metingen zijn vergeleken (figuur 3b).

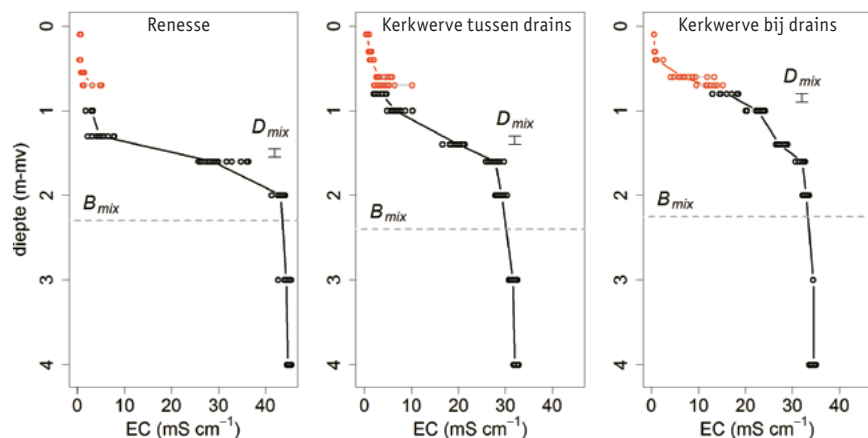
Figuur 5b de relatie tussen de gemeten dikte van de regenwaterlens (D_{mix}) en de kwel- en infiltratieflux (gebaseerd op 84.300 HEM-metingen en bijbehorende flux uit het grondwatermodel Zeeland). Naar De Louw et al. (2011).

Figure 5a the thickness of the rainwater lens characterized by D_{mix} . The map is based on the interpolation of 84,300 helicopter electromagnetic (HEM) measurements. The grey lines indicate the flight lines. The red dots indicate the location of the ECPT measurements shown in figure 3b.

Figure 5b relation of D_{mix} with infiltration and seepage flux (derived from 84,300 HEM-measurements and groundwater model of Zeeland). After De Louw et al. (2011).

Figuur 6 gemeten EC-profielen in de tijd voor zowel de verzadigde zone (zwart) als de onverzadigde zone (rood) voor twee landbouwpercelen nabij Renesse en Kerkwerve. De stippen op een bepaalde diepte geven alle maandelijkse metingen weer over een periode van twee jaar, de getrokken lijn geeft de mediane waarde aan. Tevens is de positie en jaarlijkse variatie van D_{mix} voor de tweejarige meetperiode weergegeven. Naar De Louw *et al.* (2013).

Figure 6 measured depth profiles of soil water salinity (in red) and groundwater salinity (in black) for two agricultural fields nearby Renesse and Kerkwerve. The individual measurements are indicated by dots and median values are connected by a full line. Measurements were taken every month during a period of two years. The amplitude of the displacement of D_{mix} during the monitoring period is indicated. After De Louw *et al.* (2013).



Mechanisme van regenwaterlensvorming

De geringe dikte van regenwaterlenzen in kwelgebieden wordt primair veroorzaakt door de permanent opwaartse grondwaterstroming die voorkomt dat geïnfiltreerd regenwater het diepere grondwatersysteem bereikt (figuur 2a). Grondweraanvulling, kwelflux en drainage diepte zijn de belangrijkste factoren die de karakteristieken van deze ondiepe regenwaterlenzen in kwelgebieden bepalen.

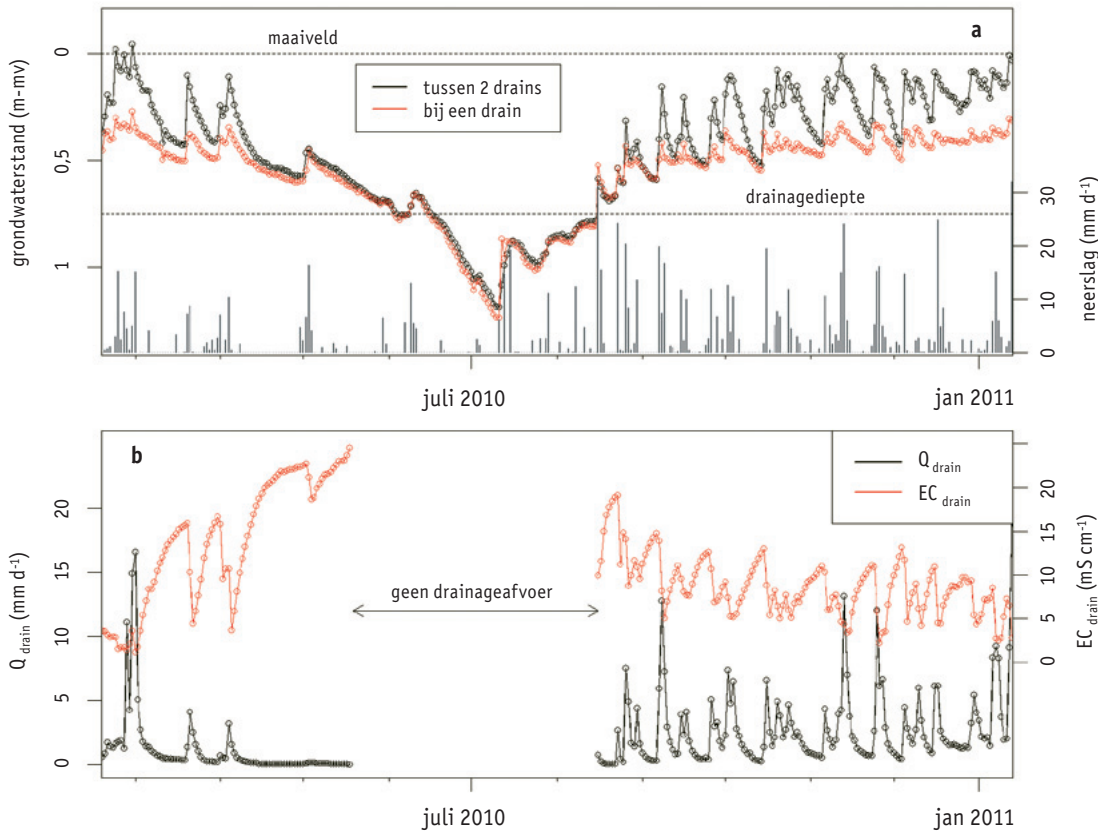
In tegenstelling tot deze regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden, wordt de neerwaartse stroming van regenwater in infiltratiegebieden alleen beperkt door de opwaartse kracht (drijfvermogen) van het onderliggende zoute grondwater. De dichtheid van dit zoute grondwater bepaalt in belangrijke mate de dikte van de lens volgens het Badon Ghyben-Herzberg-principe (BGH), zie Drabbe en Badon Ghijben (1889) en Herzberg (1901). In ideale homogene situaties kan de diepte van het zoet-zout grensvlak (H) worden geschat met de volgende BGH-formule: $H = h / \alpha$, waarbij h de opbolling van de grondwaterstand en α het relatieve dichtheidsverschil tussen het zoete en zoute water is. Uitgaande van zee-

water met een α van 0,025 is de diepte van het zoet-zout grensvlak gelijk aan $40 \times h$. Dit laat duidelijk zien dat een kleine opbolling tot een zeer dikke zoetwaterlens kan leiden en verklaart de sterke toename in lensdikte bij de overgang van een kwel- naar infiltratiesituatie, zoals in het veld gevonden en geïllustreerd in figuur 4 en 5b. Dit mechanisme, dat zich dus beperkt tot de (permanente) infiltratiegebieden, produceert zoetwaterlenzen (BGH-lenzen) met een dikte variërend van 5-20 meter in zandige kreekruggen tot minimaal 100 meter in de duinen (figuur 5a).

Dynamiek regenwaterlenzen

Maandelijkse metingen tonen aan dat het zoutprofiel en karakteristieken van de mengzone niet veel variëren in de tijd (figuur 6). De jaarlijkse variatie van de positie van D_{mix} is hooguit 10-25 centimeter en de ligging van B_{mix} is nagenoeg constant in de tijd. Door dagelijkse variatie in neerslag, verdamping en drainage is de grondwaterstand veel dynamischer. De wisselwerking tussen de sterk fluctuerende grondwaterstand en het relatief statische zoutprofiel bepaalt in belangrijke mate het zoutgehalte van het bodemwater.

Voor het perceel nabij Kerkwerve zijn zoutgehalten in de wortelzone gemeten tot 18 mS/cm (figuur 6). Het zoutgehalte van het bodemwater vertoont een duidelijke seizoensvariatie met hogere zoutgehalten in de zomer dan in de winter. 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. Het zoutgehalte van de drainageafvoer is veel dynamischer dan dat van het bodem- en grondwater. Tijdens regenbuien stijgt de grondwaterstand, neemt de drai-



Figuur 7a gemeten grondwaterstand bij een drain en tussen 2 drains van een landbouwperceel bij Kerkwerve.

Figuur 7b gemeten drainageafvoer (Q_{drain}) en het zoutgehalte van het drainagewater (EC_{drain}) op dezelfde locatie. Naar De Louw et al. (2013).

Figure 7a measured water table of an agricultural field near Kerkwerve at a drain tile and between two drain tiles.

Figure 7b measured drain tile discharge (Q_{drain}) and the salinity of the drain water (EC_{drain}) at the same location. After De Louw et al. (2013).

nageafvoer snel toe en daalt direct het zoutgehalte van het drainagewater (figuur 7b). Na de regenbuien, als de drainageafvoer afneemt, stijgt het zoutgehalte van het drainagewater weer. Hoe lager de drainageafvoer, hoe hoger het zoutgehalte. In de zomerperiode kan het zoutgehalte oplopen tot 25 mS/cm. In de loop van de winter neemt het zoutgehalte steeds verder af maar daalt nooit beneden de 2 mS/cm, wat betekent dat er zelfs tijdens de meest natte perioden ook nog zout kwelwater via de drains wordt afgevoerd. Sterker nog, de hoogste zoutvrachten naar het oppervlaktewater vinden plaats

wanneer het zoutgehalte het laagst is. 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 met grote hoeveelheid neerslag en ondiep grondwater dat ook tot afvoer komt. 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.

Klimaatverandering en mitigerende maatregelen

Modelberekeningen tonen aan dat de regenwaterlenzen door hun ondiepe ligging erg kwetsbaar zijn voor klimaatverandering waarbij drogere zomers en nattere winters worden voorspeld. Het extra winterwater wordt effectief door het intensieve drainagesysteem afgevoerd en draagt niet bij aan de voeding van de regenwaterlens, terwijl in de zomer de hogere verdamping tot krimpings van de lens leidt. Hierdoor nemen zoutgehaltes in de regenwaterlens toe, met als gevolg een toename van zoutgehaltes van het drainagewater en het bodemwater in de wortelzone gedurende het zomerhalfjaar. Daarnaast zal voor landbouwpercelen die nabij de Zeeuwse kust liggen (minder dan 1 kilometer van zee) de verwachte zeespiegelstijging leiden tot een toename van de zoute kwel, waardoor de regenwaterlenzen verder onder druk komen te staan.

Foto **Jens de Louw** TEC-prikstokmeting van het zoutgehalte van het kwelwater onder de slootbodem.



Aan de verwachte klimaatverandering en zeespiegelstijging valt op lokaal niveau niet veel te doen. Echter, dit onderzoek heeft aangetoond dat naast grondwateraanvulling en kwel, de karakteristieken van de regenwaterlens ook sterk door de drainagediepte worden bepaald en dit valt wel relatief eenvoudig te beïnvloeden. Daartoe is binnen het Kennis-voor-Klimaat-project GO-FRESH een nieuw drainagesysteem ontwikkeld om de regenwaterlens te laten groeien (Drains2buffer). Dit systeem wordt sinds 2013 getest op het landbouwperceel nabij Kerkwerpe (Oude Essink et al., 2014). Met Drains2buffer wordt regelbare drainage toegepast waarbij de drains dieper liggen dan traditioneel maar het drainagepeil gehandhaafd blijft. Er wordt dus niet intensiever gedraineerd. Tijdens regenbuien wordt daarmee 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 zoutgehaltes van het bovenste grondwater waardoor minder zout grondwater via capillaire opstijging in de zomer de wortelzone kan bereiken.

Binnen het project GO-FRESH worden in Zeeland nog twee andere innovatieve maatregelen getest om de zoetwaterbeschikbaarheid voor de landbouw te vergroten en negatieve effecten van klimaatverandering te mitigeren (Oude Essink et al., 2014): (1) het Kreekrug Infiltratie Systeem (Pauw et al., 2015) en (2) de Freshmaker (Zuurbier et al., 2014). Beide methoden zijn bedoeld voor ondergrondse opslag van winterse zoetwateroverschotten in de zoute ondergrond. Dat laatste maakt het extra lastig omdat de opwaartse druk van het zoute grondwater het zoete water omhoog wil drukken. De twee methoden houden hier op verschillende manieren rekening mee. Het Kreekrug Infiltratie Systeem maakt ge-

bruik van het natuurlijke evenwicht tussen zoet en zout grondwater volgens het BGH-principe waarbij een hogere grondwaterstand leidt tot een dikkere zoetwaterlens. Met een regelbaar drainage/infiltratiesysteem wordt in tijden van overschot zoet oppervlaktewater geïnfilteerd en een gemiddeld hogere grondwaterstand gerealiseerd. Bij de Freshmaker wordt naast infiltratie van zoet water ook zout grondwater onder de zoetwaterlens onttrokken om de lens op zijn plek te houden. De eerste resultaten van de twee veldproeven laten zien dat ze effectief de zoetwaterbeschikbaarheid kunnen vergroten. Deze twee maatregelen zijn geschikt voor toepassing in infiltratiegebieden, zoals in hoger gelegen kreekkruggen, waar bestaande zoetwaterlenzen kunnen worden vergroot en duurzaam worden gebruikt voor irrigatie. Drains2buffer is juist bedoeld als maatregel voor de zoute kwelgebieden waarmee de groei van dunne regenwaterlenzen wordt bevorderd ter voorkoming van te hoge zoutgehalten in de wortelzone.

Conclusies

Het veldonderzoek in Zeeland heeft aangetoond dat regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden erg dun zijn (minder dan 2 meter) en zoet grondwater in veel gevallen ontbreekt. De permanente opwaartse stroming van zout kwelwater belemmert de infiltratie van regenwater naar het diepere grondwatersysteem. Grondwateraanvulling, kwelflux en drainage diepte zijn de belangrijkste factoren die de karakteristieken van de regenwaterlens bepalen. Ondanks de dynamische processen in de ondiepe ondergrond door neerslag en verdamping is het zoutprofiel van de regenwaterlens vrij constant in de tijd. De positie van de mengzone verandert nauwelijks in de tijd (minder dan 25 cm). Het zoutgehalte van het drainage water is veel dynamischer en verandert continu door het samenspel van neerslag, verdamping en afvoer van



Foto **Perry de Louw** elektromagnetische metingen vanuit een helikopter boven Schouwen-Duivenland voor het bepalen van de dikte van de regenwaterlens en het zoutgehalte van het grondwater met de diepte.

grondwater uit de regenwaterlens. Het zoutgehalte in de wortelzone kan behoorlijk oplopen door capillaire opstijging van het bovenste water uit de regenwaterlens dat bij dalende grondwaterstand steeds zouter wordt. De ondiepe ligging van de regenwaterlenzen maakt ze ook erg kwetsbaar voor klimaatverandering. Drogere zomers zullen namelijk leiden tot nog dunnere lenzen en hogere zoutgehalten. Aanpassingen in het drainagesysteem kunnen de negatieve effecten van klimaatveranderingen compenseren. Dit wordt momenteel getest in het project GO-FRESH.

Summary

Thin rainwater lenses in saline seepage areas

Perry de Louw, Gualbert Oude Essink, Sara Eeman, Esther van Baaren, Esther Vermue, Joost Delsman, Pieter Pauw, Bernhard Siemon, Jan Gunnink &

Vincent Post

freshwater availability, saline seepage, freshwater lens, groundwater, monitoring, airborne geophysics, climate change.

In low-lying coastal areas, saline groundwater may reach the surface by upward groundwater flow. This process is referred to as saline seepage and leads to the salinization of surface waters, shallow groundwater and soil water in the root zone. Fresh groundwater is often only present in the form of thin rainwater lenses which make the cultivation of crops possible. The characteristics and dynam-

ics of thin rainwater lenses in saline seepage areas were examined in the southwestern delta of the Netherlands by using different types of field measurements. Point measurements below 30 agricultural fields showed a gradual mixing zone between infiltrated rainwater and upward seeping saline groundwater. The centre of this mixing zone was found at a very shallow depth (less than 2 meters) and almost all mapped lenses lacked truly fresh groundwater. The limited size of rainwater lenses is caused by the permanent upward groundwater flow. The small dimensions of the rainwater lenses, the rapid removal of recharge through drain tiles and the loss of freshwater by evapotranspiration, make them very vulnerable to climate change. Alternative tile-drainage configurations that promote storage of infiltrated freshwater in rainwater lenses could be a way to mitigate the potential adverse effects of future climate change.

Foto **Perry de Louw** een nest van peilbuizen voor het monitoren van het zoutgehalte van het grondwater op verschillende dieptes in een landbouwperceel nabij Kerkwerve.



Literatuur

Baaren, E.S. van, G.H.P. Oude Essink, G.M.C.M. Janssen, P.G.B. de Louw, R. Heerdink & B. Goes, 2015. Verzoeting en verzilting van het freatisch grondwater in Zeeland: resultaten van een 3D-dichtheidsafhankelijk grondwatermodel. Deltares Rapport.

Delsman, J.R., K.R.M. Hu-a-ng, P.C. Vos, P.G.B. de Louw, G.H.P. Oude Essink, P.J. Stuyfzand & M.F.P. Bierkens, 2014. Paleomodelling of coastal saltwater intrusion during the Holocene: an application to the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 3891–3905.

Drabbe, J. & W. Badon Ghijben, 1889. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. *Tijdschr. Van Koninklijk Instituut Van Ingenieurs* 5, 8–22.

Herzberg, A., 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *J. Gasbeleucht. Wasserversorgung* 44, 815–819.

Langevin, C.D., D.T. Thorne, A.M. Dausman, M.C. Sukop & W. Guo, 2007. SEAWAT Version 4: A computer program for simulation of multi-species solute and heat transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. Book 6, Chapter A22, 39pp.

Louw, P.G.B. de, S. Eeman, B. Siemon, B.R. Voortman, J. Gunnink,

E.S. Van Baaren & G.H.P. Oude Essink, 2011. Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 3659-3678.

Louw, P.G.B. de, S. Eeman, G.H.P. Oude Essink, E. Vermue & V.E.A. Post, 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.

Louw, P.G.B. de, 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.

Oude Essink, G.H.P., E.S. van Baaren & P.G.B. de Louw, 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 46, doi: 10.1029/2009WR008719.

Oude Essink, G.H.P., E.S. van Baaren, K.G. Zuurbier, J. Velstra, J. Veraart, W. Brouwer, M. Faneca Sánchez, P.S. Pauw, P.G.B. de Louw, J. Vreke & M. Schoevers, 2014. GO-FRESH: Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening, KvK 151/2014, ISBN EAN 978-94-92100-12-2, 84 p.

Pauw, P., E.S. van Baaren, M. Visser, P.G.B. de Louw & G.H.P. Oude Essink, 2015. Testing the feasibility of increasing a fresh water lens below a creek ridge by artificial recharge using a controlled drainage system. *Hydrogeology Journal* (in revision).

Post, V.E.A. & H. Kooi, 2003. Rates of salinization by free convection in high-permeability sediments: Insights from numerical modeling and application to the Dutch coastal area. *Hydrogeology Journal* 11 (5), 549-559.

Siemon, B., A. Ullmann, I. Mitreiter, M. Ibs-von Seht, W. Voß & J. Pielawa, 2011. Airborne geophysical investigation of CLIWAT pilot areas, survey area Schouwen, The Netherlands. Hannover, BGR Archives-No. 0129932.

Vos, P.C., J. Bazelmans, H.J.T. Weerts & M.J. Van der Meulen, 2011. Atlas van Nederland in het Holoceen. Amsterdam, 93 pp.

Zuurbier, K., J. Kooiman, M. Groen, B. Maas & P.J. Stuyfzand, 2014. Enabling successful aquifer storage and recovery of freshwater using horizontal directional drilled wells in coastal aquifers. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000990, B4014003.