
Het langetermijngeheugen van de zoet-zoutverdeling

Perry de Louw^{1,2}, Gualbert Oude Essink^{1,3}, Joost Delsman¹, Esther van Baaren¹, Ilja America², Joeri van Engelen^{1,3}

Dit artikel beschrijft de ontwikkeling van de zoetzoutverdeling in het Nederlandse grondwater. Deze verdeling is sterk bepaald door de paleogeografische ontwikkeling gedurende het Holoceen en kent een groot langetermijngeheugen. Er worden twee typen grondwatersystemen beschreven: het West-Nederland systeem, waar autonome verzilting en wellen sleutelbegrippen zijn, en het Zeeuwse systeem, waar drie typen zoetwaterlenzen worden besproken. We laten aan de hand van de FRESHEM-Zeeland-resultaten zien dat airborne-elektromagnetische meettechnieken zeer geschikt zijn voor het in beeld brengen van de zoet-zoutverdeling. Vervolgens wordt ingegaan op het modelleren van de initiële zoet-zoutverdeling, waarbij de combinatie van paleomodelleren en gebruik van metingen een geschikte methode lijkt. De initiële zoet-zoutverdeling is een belangrijke modelparameter bij het voorspellen van toekomstige veranderingen van zoete grondwatervoorraden als gevolg van ingrepen, klimaatverandering en zeespiegelstijging.

Inleiding

In het kustgebied van Nederland is een groot deel van het grondwater brak of zout. De aanwezigheid van dit zoute grondwater bemoeilijkt de exploitatie van zoet grondwater voor drinkwater, industrie en landbouw. Daarnaast bereikt het brak-zoute grondwater in de laagstgelegene kustgebieden het oppervlak door kwel wat leidt tot verzilting van het oppervlaktewater, het ondiepe grondwater en het bodemwater in de wortelzone. De verwachting is dat door klimaatverandering, toekomstige stijging van de zeespiegel en bodemdaling, de zoute kwel zal toenemen en de beschikbaarheid van zoet grond- en oppervlaktewater zal afnemen. Kennis van de zoet-zoutverdeling en de processen die deze verdeling beïnvloeden zijn onontbeerlijk voor een duurzame zoetwatervoorziening in het Nederlandse kustgebied, nu en in de toekomst.

In dit artikel wordt het ontstaan van de zoet-zoutverdeling in Nederland besproken, hoe we deze in beeld kunnen brengen met behulp van airborne meetmethoden en hoe we er mee om moeten gaan in numerieke grondwatermodellen. Tevens worden enkele buitenlandse voorbeelden van zoet-zoutverdelingen in delta's gegeven.

1 Deltares, grondwaterbeheer (perry.delouw@deltares.nl),

2 Wageningen Universiteit, soil physics and land management,

3 Utrecht Universiteit, fysische geografie

Zoet-zout definities

Er bestaan verschillende definities van zoet-brak-zout grondwater. Het gewicht van het totaal aantal opgeloste zouten wordt vaak aangeduid met TDS (Total Dissolved Solids) in gram per liter. Zeewater heeft een typische TDS van ongeveer 35 gram per liter zeewater, waarvan meer dan 70% opgelost keukenzout (natriumchloride). Een veel gebruikte classificatie wordt gegeven door Stuyfzand (1993) die het grondwater in acht typen verdeelt op basis van de chlorideconcentratie (Tabel 1). In Stuyfzand's classificatie is water zoet bij een Cl-concentratie kleiner dan 150 mg/l, en zout bij een concentratie groter dan 10.000 mg/l. Ter vergelijking: Noordzeewater heeft een Cl-concentratie van ongeveer 16.000-17.000 mg/l, afhankelijk van de locatie langs de kust. In Zeeland wordt gesproken van 'landbouwkundig zoet' wanneer de Cl-concentratie lager is dan 1000 mg/l, in verband met gebruik van het water voor landbouwgewassen als aardappelen, uien en tarwe.

Tabel 1: Classificatie in acht hoofdtypen zoet, brak en zout grondwater op basis van de Cl-concentratie (Stuyfzand, 1993).

Grondwatertype	Chloride concentratie (mg Cl/l)
Oligohalien	0 - 5
Oligohalien-zoet	5 - 30
Zoet	30 - 150
Zoet-brak	150 - 300
Brak	300 - 1000
Brak-zout	1000 - 10.000
Zout	10.000 - 20.000
Hyperhalien of brijn	≥20.000

De EC (Electrical Conductivity, ook wel Elektrisch Geleidingsvermogen of Geleidbaarheid) is een veel gebruikte eenheid om het zoutgehalte aan te geven, omdat dit zeer eenvoudig met een EC-meter in het veld is te meten. Bij de geleidbaarheid wordt niet alleen chloride gemeten, maar ook andere opgeloste anionen zoals bicarbonaat, sulfaat en nitraat. De EC wordt uitgedrukt in micro-Siemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) of milli-Siemens/cm (mS/cm) voor een te kiezen referentietemperatuur (T_{ref}) van 20 of 25 graden. De geleidbaarheid is maar liefst 40% hoger bij een temperatuur van 25 graden ten opzichte van 10 graden. Daarom moet worden gecorrigeerd voor temperatuur om het eenduidig vergelijken van metingen mogelijk te maken, wat resulteert in de 'specifieke geleidbaarheid' (ECs). In het brak-zoute bereik is Cl het dominante anion en bestaat er een relatief sterk lineaire relatie tussen de EC en de Cl-concentratie. Voor ECs > 2,5 mS/cm kan de volgende ECs-Cl relatie worden toegepast (voor $T_{\text{ref}}=25^\circ\text{C}$):

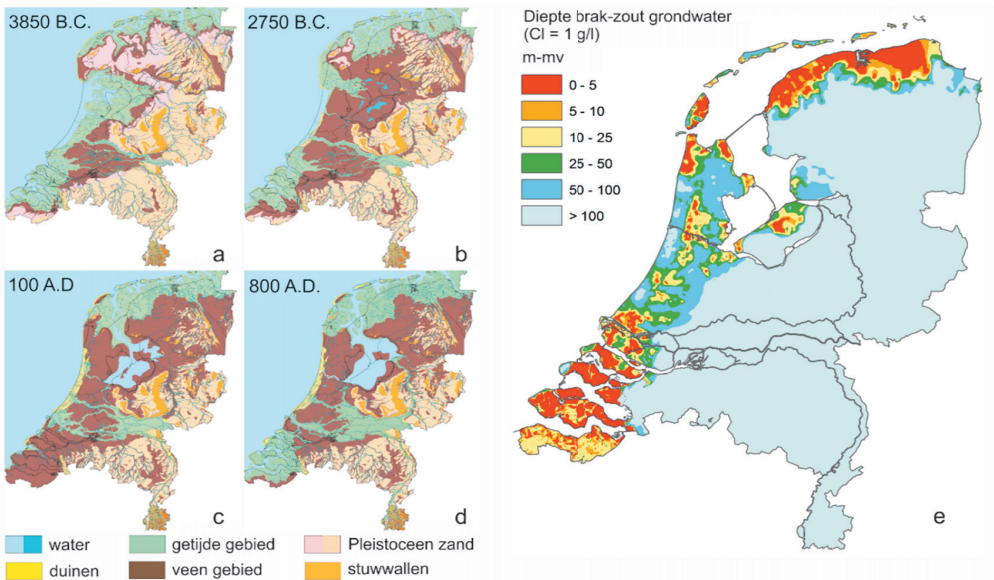
$$CL = 0,36 \text{ ECs} - 0,45$$

Met het chloridegehalte Cl in gram/liter en de specifieke geleidbaarheid ECs in mS/cm (afgeleid van 79 grondwateranalyses uit Zeeland; De Louw e.a., 2011b).

Zout grondwater door Holocene transgressies

Figuur 1 laat de diepte van het brak-zoute grondwater in Nederland zien. Het zoute grondwater in de ondergrond van het Nederlandse kustgebied is hoofdzakelijk afkomstig van transgressies gedurende het Holoceen (Post, 2004). Dit waren perioden waarin de zee aan invloed won en de kustlijn zich landinwaarts verplaatste. Tijdens deze transgressies kon het zeewater door dichtheidsstroming relatief snel de onderliggende watervoerende pakketten infiltreren. Post en Kooi (2003) berekenden met conceptuele modellen dat door dit proces van 'dichtheidsafhankelijke vrije convectie' 100 meter dikke watervoerende pakketten binnen één à twee eeuwen kunnen verzilten. Op geologische tijdschaal is dit relatief snel.

Afbeelding 1a-d toont de paleogeografische ontwikkeling van Nederland in vier fasen (Vos et al., 2011). De maximale transgressie vond omstreeks 6000 jaar geleden plaats. De verbreiding van deze maximale transgressie komt goed overeen met het gebied waar het brak-zoute grondwater binnen 100 m diepte wordt aangetroffen (vergelijk Afbeelding 1a met Afbeelding 1e). Kort daarna ontstonden er strandwallen die het kustgebied van West-Nederland beschermden tegen de zee en waarachter het veen kon groeien onder de invloed van neerslag. Vanaf dat moment hebben in West-Nederland geen transgressies meer plaatsgevonden en kon in dit gebied zoet regen- en rivierwater de bodem infiltreren. Daarom vinden we in West-Nederland het brak-zoute grondwater over het algemeen veel dieper dan in Zeeland en Noord-Nederland (vergelijk Afbeelding 1b met Afbeelding 1e).

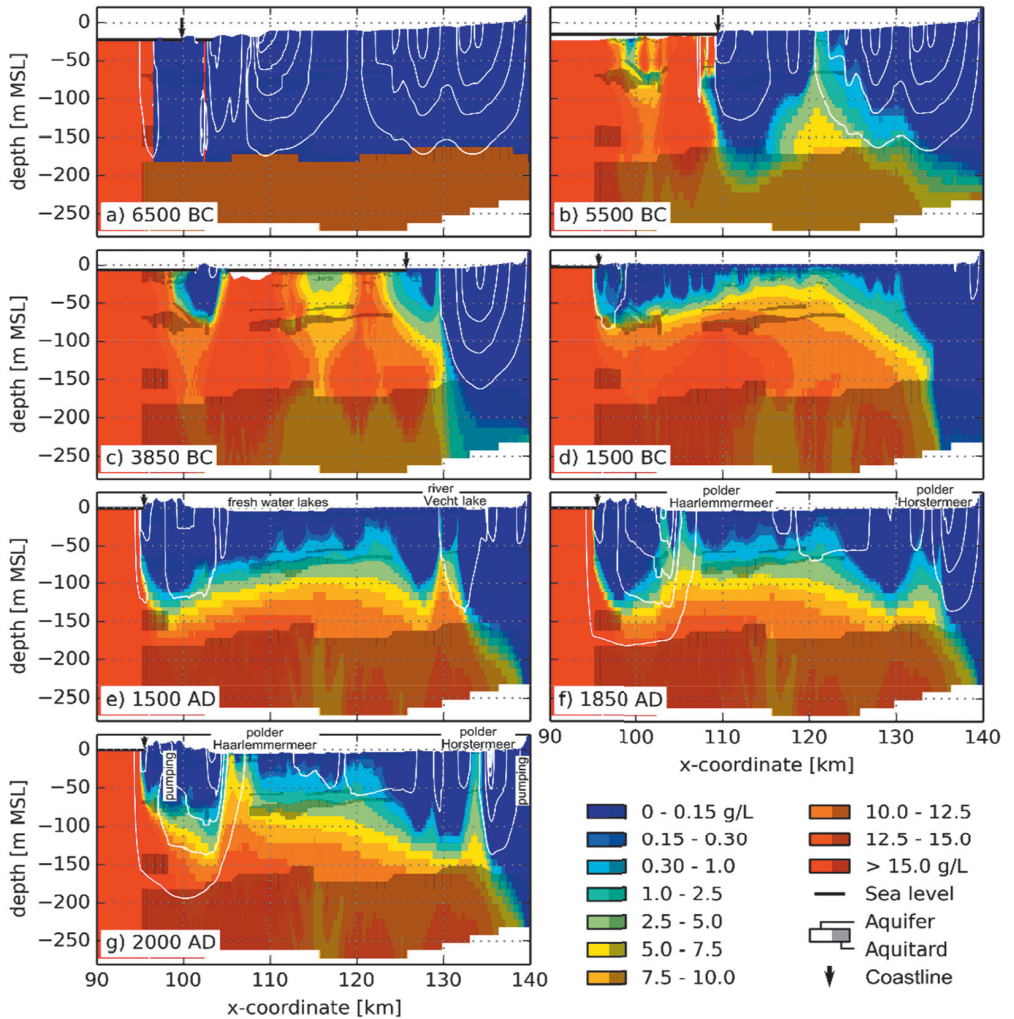


Afbeelding 1: De paleogeografische ontwikkeling van Nederland in vier fasen: (a) 3850 B.C.; (b) 2750 B.C.; (c) 100 A.D.; (d) 800 A.D. (Vos e.a., 2011); en (e) de diepte (in meter beneden maaiveld) van het brak-zoute grondwater (grens CI = 1000 mg/l) afkomstig uit het Holoceen.

Deze laatstgenoemde gebieden hebben tot zeer recent, 800 tot 1100 AD, onder invloed gestaan van de zee. Rond het begin van de jaartelling was Zeeland tijdelijk bedekt met veen maar door onder andere het afgraven voor turfwinning en ontwatering door de Romeinen kreeg de zee weer vrij spel tijdens stormvloed. Het veen erodeerde en Zeeland, met uitzondering van het zuidelijke deel van Zeeuws-Vlaanderen, stond weer onder invloed van de zee. Dit duurde meer dan enkele eeuwen waardoor de bovenste watervoerende pakketten weer zout werden. Zeer slecht doorlatende kleilagen, zoals die van de Boomse klei (Rupel Formatie), belemmerden diepere infiltratie van zout water waardoor daaronder vaak pre-Holoceen zoet grondwater wordt aangetroffen. De recente transgressiegebieden (Zeeland, Goeree-Overflakkee en Noord-Nederland) worden gekenmerkt door het zeer ondiep (< 5 -mv) voorkomen van brak-zout grondwater (vergelijk Afbeelding 1d met Afbeelding 1e). In de volgende twee paragrafen worden twee systemen nader beschreven: het West-Nederlandse en het Zeeuwse systeem.

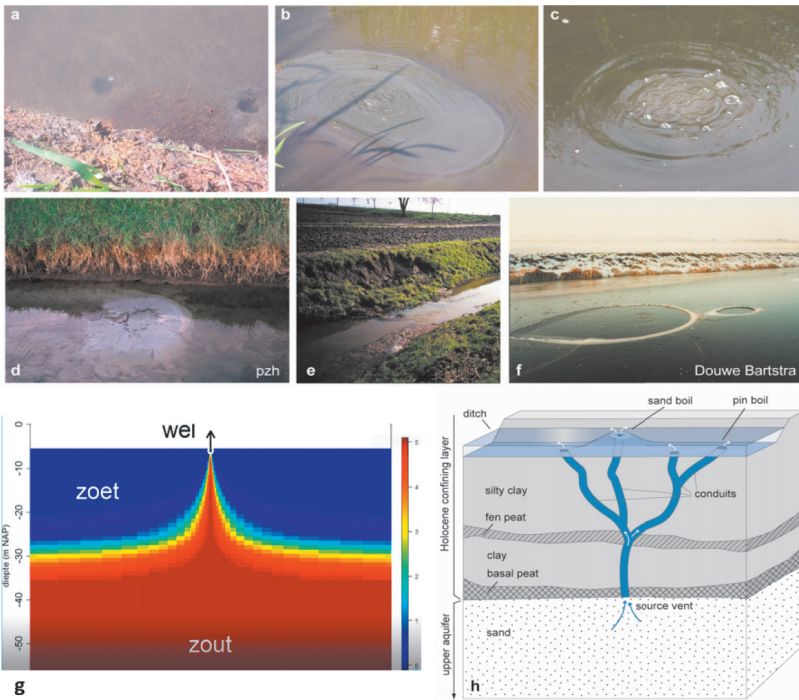
West-Nederland: autonome verzilting en wellen

De transgressies tot 3800 BC (infiltratie van zout water) en de veenvorming die daarop volgde (leidend tot infiltratie van zoetwater) hebben de karakteristieke zoet-zoutverdeling van West-Nederland bepaald. Vervolgens drukte de mens vanaf de 15^e eeuw een stempel op de zoet-zoutverdeling. Door de ontwatering van veen- en kleigebieden, veenexploitatie en het droogmaken van meren en plassen, zoals Haarlemmermeer, Zuidplas, Beemster, Wormer, Schermer en Purmer (Schultz, 1992), veranderde de grondwaterstroming van zeewaarts naar de richting van de diepe polders, die gemiddeld vier tot zes meter onder zeeniveau kwamen te liggen. Het aanwezige zoete grondwater (dat bovenop het zoute water lag) begon langzaam naar het oppervlak te stromen. Delsman e.a. (2014) hebben deze ontwikkeling voor een 2D-doorsnede loodrecht op de kustlijn, door de Haarlemmermeerpolder en Horstermeer, met een dichtheidsafhankelijk grondwatermodel (SEAWAT) nagebootst (afbeelding 2). Sinds de ontwatering van het veen en zeker sinds het ontstaan van de diepe droogmakerijen stroomt het brak-zoute transgressiewater weer terug omhoog naar het oppervlak, met zoute kwel in de polders tot gevolg. Dit proces gaat zeer langzaam en de zoet-zoutverdeling is nog lang niet in evenwicht met de nieuwe randvoorwaarden in het westen van het land; het grondwatersysteem heeft een duidelijk langetermijngeheugen. Met verloop van tijd bereikt steeds ouder, dieper en daardoor zouter grondwater het oppervlaktewater. Dit proces zal de komende eeuwen nog gewoon doorgaan en noemen we 'autonome verzilting'.



Afbeelding 2: De ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling gedurende het Holoceen voor een dwarsdoorsnede loodrecht op de kust, door de duinen, Haarlemmerpolder, Horstermeerpolder en Utrechtse heuvelrug, gemodelleerd met SEAWAT (uit Delsman e.a., 2014).

Boukes e.a. (2017) brachten de ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling vanaf 7500 BP voor de provincie Friesland in beeld met behulp van een zoet-zoutmodel voor een 2D-profiel loodrecht op de kust. Ook in dit deel van Nederland is er sprake van autonome verzilting en een langetermijngeheugen van de zoet-zoutverdeling.



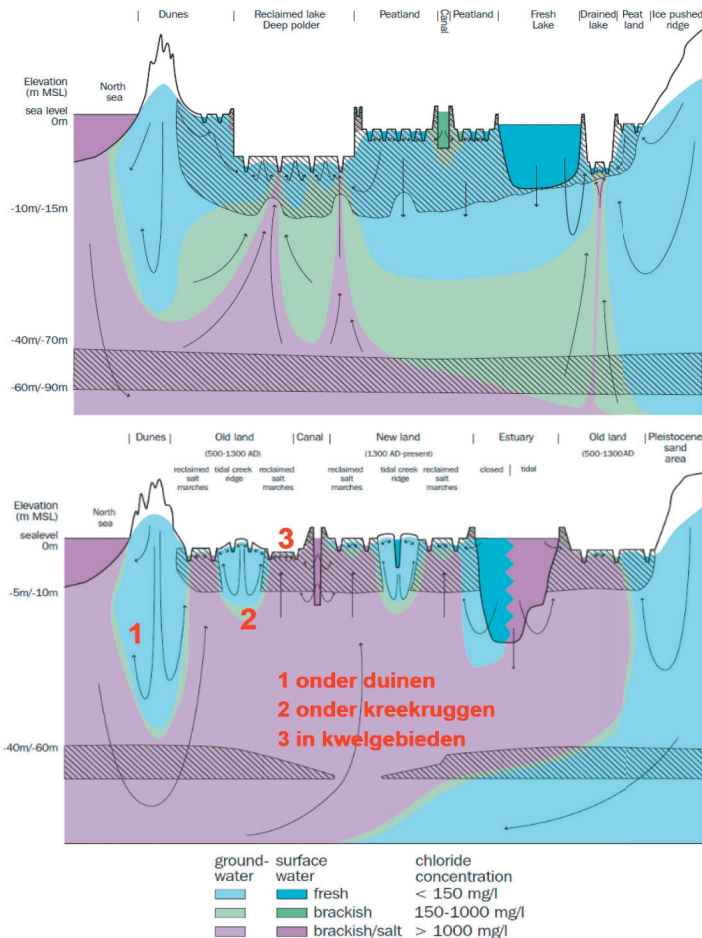
Afbeelding 3: Wellen als dominante verziltingsbron in diepe polders: (a) uitstroomopeningen van een wel; (b) een zandwel: door de hoge stroomsnelheid door een wel wordt zand uit het eerste watervoerende pakket naar de oppervlakte getransporteerd; (c) ontgassing van methaan via wellen; (d) zandwel; (e) uitzakken van slootkanten door wellen; (f) door de constante temperatuur van 11 graden van uittredend welwater, vriezen ze niet dicht; (g) zoutwater opkegeling door een wel: door het zeer lokaal, geconcentreerd afvoeren van grondwater, trekt de wel diep en daardoor zout grondwater aan, vergelijkbaar met een grondwaterwinning; (h) diagram dat een wel door de Holocene deklaag met verschillende uitstroomgaten representeert (overgenomen uit De Louw e.a., 2010 en aangepast).

Wellen doorbreken de zoet-zoutverdeling

Sinds een aantal jaren weten we dat verzilting van de diepe polders vanuit het grondwater door wellen wordt gedomineerd (De Louw, 2013). Wellen zijn gaten in de deklaag waardoor met hoge snelheid grondwater uit het eerste watervoerend pakket omhoog stroomt (Afbeelding 3). Ze ontstaan door opbarsting van de deklaag die optreedt wanneer de waterdruk onder de deklaag groter wordt dan het gewicht van de deklaag. Voor Polder de Noordplasp vindt meer dan 60% van de zoutbelasting plaats via wellen (De Louw e.a., 2011a) en voor delen van de Haarlemmerpolder zelfs meer dan 80% (Delsman, 2015). De dominante bijdrage van wellen aan de verzilting komt doordat ze veel zouter zijn dan de ondiepe diffuse kwel als gevolg van opkegeling van zout grondwater. Door de zeer lokale, geconcentreerde vorm van kwel met hoge snelheden voeren ze dieper en daardoor zouter grondwater af dan diffuse kwelsystemen (De Louw e.a., 2013). Diffuse kwelsystemen voeren voornamelijk grondwater uit het bovenste deel van het eerste watervoerende pakket af, en dat is in West-Nederland voornamelijk zoet. Wellen doorbreken als het ware de zoet-zoutverdeling

van West-Nederland (Afbeelding 4). Wellen kunnen ook zoet zijn, als er in het eerste watervoerende pakket geen brak-zout grondwater aanwezig is, zoals in de polder Nieuwkoop.

Door de snelle grondwaterstroming via wellen bereikt de zoutconcentratie van wellen al veel sneller een quasi-evenwicht. De eerste vijf jaar nemen zoutconcentraties na het ontstaan van een wel flink toe waarna de concentratie stabiliseert, blijkt uit modelberekeningen (De Louw e.a., 2013). Als het zoutgehalte van de dominante verziltingsbron inderdaad niet significant meer toeneemt, is dit goed nieuws voor de autonome verzilting van diepe polders in West-Nederland. Hoe dit proces zich verhoudt tot autonome verzilting op grotere schaal is echter nog onbekend. Daarnaast kan het aantal wellen natuurlijk toenemen als gevolg van onder andere bodemdaling en peilverlagingen.



Afbeelding 4: Typische zoet-zoutverdeling voor (a) West-Nederland waar zoet grondwater op brak-zout grondwater wordt aangetroffen en waar wellen via zoutwater opkenging de verzilting van de diepe polders domineren; (b) Zeeland waar de recente transgressie (200-1100 AD) de watervoerende pakketten hebben verzilt en sinds inpoldering zoetwaterlenzen konden groeien onder de hoger gelegen delen zoals duinen (type 1) en kreekkruggen (type 2). In de zoute kwelgebieden worden zeer dunne (< 2 m) regenwaterlenzen aangetroffen (type 3).

Een opmerkelijk voorbeeld is Polder Groot-Mijdrecht. Deze polder ligt ver landinwaarts en is veruit het zoutst van Nederland. Door de dunne slappe deklaag, bestaande uit hoofdzakelijk veen, konden wellen makkelijk ontstaan na drooglegging van de polder in 1864. Kwel vindt voor meer dan 80% plaats via wellen en de gemiddelde kwelflux van deze lek geprikte polder is extreem groot, zo'n 5,7 mm/dag (Zaadnoordijk e.a., 2009). Door deze grote opwaartse snelheid (ter vergelijking: de kwelflux in de Noordplaspolder en Haarlemmermeerpolder is slechts zo'n 0,5 mm/dag) heeft het diepe, zoute transgressiewater diffuus het oppervlak al bereikt. De combinatie van de hoge kwelflux en het hoge zoutgehalte leidt tot zeer hoge zoutbelastingen.

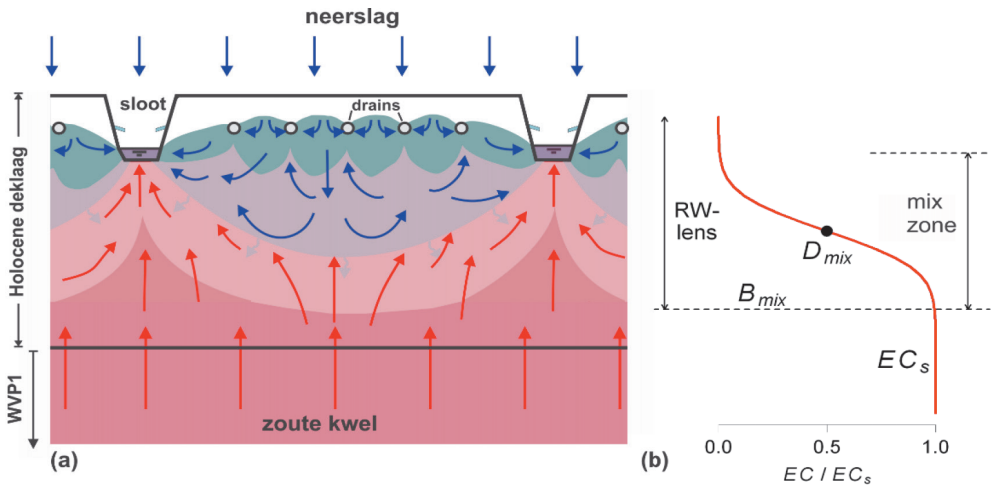
Zoetwaterlenzen in Zeeland

De zoet-zoutverdeling in het recente transgressiegebied Zeeland is minder complex dan die van West-Nederland en is ook min of meer in evenwicht met de heersende randvoorwaarden. Voordat Zeeland werd ingepolderd, vanaf ongeveer 1100-1300 AD, stond het gebied een flink aantal eeuwen onder invloed van de zee. Hierdoor werd, met uitzondering van de boven het zeewater uitstekende duinen, het zoete grondwater in onderliggende watervoerende pakketten vervangen door zout water. Na inpoldering ontstond er ruimte voor neerslagwater om in de bodem te infiltreren waardoor zoetwaterlenzen konden ontstaan, ingebed in een verder redelijk uniforme ondiepe zoute ondergrond. Hierdoor bestaat er een relatief scherpe overgang van zoet naar zout grondwater. De overgangszone van zoet naar zout is slechts enkele meters dik (Afbeelding 6).

De zoetwaterlenzen in Zeeland kunnen grofweg in drie typen worden onderverdeeld (Afbeelding 4): (1) dikke zoetwaterlenzen onder de duinen (30 tot 200 m dik); (2) zoetwaterlenzen onder kreekruigen (tot 40 m dik); (3) dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden (dunner dan 2-3 m). De verticale stroming van grondwater bepaalt in belangrijke mate de dikte van de zoetwaterlens. Als de stroming naar beneden is gericht (infiltratie) kunnen zeer dikke lenzen ontstaan van type 1 en type 2, ook wel aangeduid als Badon Ghijben-Herzberg (BGH) lenzen, genoemd naar de onderzoekers die dit soort type lenzen al in de 19e eeuw hebben onderzocht (Drabbe en Badon Ghijben, 1889; Herzberg, 1901). Door de opwaartse kracht van het zwaardere zoute water drijft de lichtere zoetwaterbel op het zoute grondwater, analoog aan het drijven van ijs in water en conform de wet van Archimedes. Uitgaande van zoetwater met dichtheid 1000 kg/m^3 en zout water met dichtheid 1.025 kg/m^3 , is de dikte van de zoetwaterbel 40 keer de opbolling van het freatische grondwater ten opzichte van het zoute grondwater (of het zeeniveau). Dit wordt de BGH-relatie genoemd. Hoewel zeer goed te gebruiken om het proces van lensvorming uit te leggen en een eerste schatting te maken, geldt deze relatie alleen in homogene watervoerende pakketten waarbij de ondoorlatende hydrogeologische basis diep ligt en een scherpe scheiding mag worden verondersteld tussen zoet en zout grondwater. Zelfs relatief dunne scheidende lagen zullen de groei tot theoretische BGH-dikte belemmeren.

Het proces van lensvorming is heel anders in kwelgebieden waar de grondwaterstroming omhoog is gericht (type 3). De permanente opwaartse stroming van zout kwelwater belemmert de infiltratie van regenwater naar het diepere grondwater-

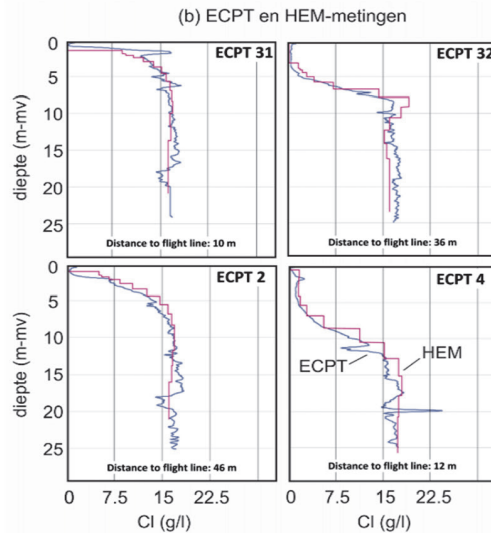
systeem (Afbeelding 5). Uitgebreid veldonderzoek in Zeeland heeft aangetoond dat regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden erg dun zijn (< 2 m) en zoet grondwater in veel gevallen ontbreekt (De Louw, 2013). De veldmetingen laten een geleidelijke overgangszone in zoutgehaltenes (mix- of meng-zone) zien tussen geïnfiltrerd regenwater en opwaarts stromend zout grondwater (Afbeelding 5). Uit veldmetingen in 17 zoute kwelgebieden verspreid over Zeeland, blijkt dat het midden van deze meng-zone zich bevindt op een zeer geringe diepte, gemiddeld 1,7 m beneden maaiveld.



Afbeelding 5. (a) Schematische weergave van een regenwaterlens zoals ze voorkomen in de zoute kwelgebieden; (b) Profiel van het zoutgehalte van het grondwater met de diepte. D_{mix} is het midden van de meng-zone waar het zoutgehalte (EC) de helft van het zoutgehalte van het kwelwater (EC_s) is. B_{mix} is de basis van de meng-zone waar het zoutgehalte gelijk is aan dat van het zoute kwelwater (EC_s) (uit: De Louw, 2013).

In tegenstelling tot het West-Nederland systeem, is de zoet-zoutverdeling in Zeeland redelijk in evenwicht met de heersende randvoorwaarden. Dit heeft alles te maken met de paleogeografische ontwikkeling van Zeeland, zoals eerder besproken. In relatief homogeen zout grondwater als gevolg van de recente transgressies vond alleen op de hogere gelegen zandlichamen (duinen en kreekruigen) infiltratie van zoetwater plaats. Deze lenzen hebben voldoende tijd gehad sinds de inpoldering van Zeeland vanaf 1300 AD, om in evenwicht te komen met de omliggende zoutwaterdruk en te groeien tot maximale dikte. Bijvoorbeeld, een 100 meter dikke zoetwaterlens heeft bij een gemiddeld neerslagoverschot van 0,8 mm/dag en een porositeit van 30% iets meer dan een eeuw nodig om te vormen, indien het totale neerslagoverschot voor de groei van de lens wordt gebruikt.

Exploiteren van deze lenzen leidt uiteraard lokaal tot verandering van de zoet-zoutverdeling. Ook het kunstmatig infiltreren van zoet water voor groei van dit soort zoetwaterlenzen onder kreekruigen, zoals in project GO-FRESH in het veld is geëxperimenteerd (Oude Essink e.a., 2014; Pauw e.a., 2015), heeft hier invloed op. Verandering van het neerslagoverschot als gevolg van klimaatverandering zal ook de dikte van de zoetwaterlenzen beïnvloeden.



Afbeelding 6: (a) Het Helicopter ElectroMagnetic (HEM)-systeem van BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), gebruikt voor de kartering van de zoetzoutverdeling in de ondergrond van Zeeland; (b) vergelijking van vier zoutprofielen gemeten door elektrische sonderingen (ECPT) met die gemeten door HEM, tijdens een pilot op Schouwen-Duiveland (De Louw e.a., 2011b).

De zoet-zoutverdeling in beeld: FRESHEM

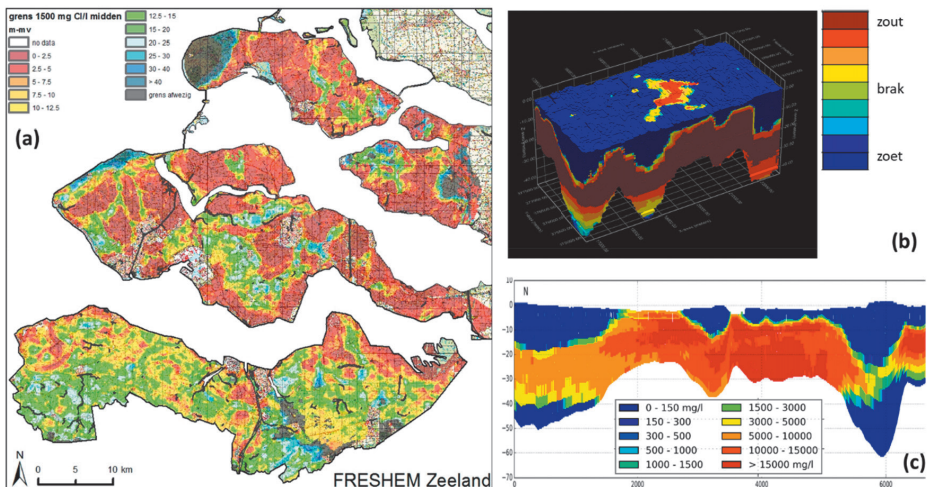
In 2009 zijn in het kader van het Interreg-project 'CLIWAT' pilots uitgevoerd met airborne ElektroMagnetische (EM) technieken in Zeeland en Friesland om een gebiedsdekkend beeld van de zoet-zoutverdeling te verkrijgen. Uit deze pilots is gebleken dat de zoet-zoutverdeling, en met name de overgang van zoet naar zout grondwater, zeer goed met deze airborne technieken in beeld is te brengen (De Louw e.a., 2011b, Faneca Sánchez e.a., 2012). Afbeelding 6 laat dit zien voor enkele locaties waar de zoutprofielen gemeten met een elektrische sondering (in-situ meting) en gemeten met Helicopter-EM worden vergeleken. Zowel het verloop met de diepte (diepte en breedte overgangszone zoet-zout) als het absolute zoutgehalte werden door HEM goed voorspeld.

De veelbelovende resultaten leidden tot het initiatief om voor de gehele provincie Zeeland de zoet-zoutverdeling met HEM-metingen in beeld te brengen: het FRESHEM-project (Delsman e.a., 2018; Van Baaren e.a., 2018). Afbeelding 7 toont de vlieglijnen. De vlieglijnen liggen over het algemeen 200 tot 300 m uit elkaar; voor specifieke interessegebieden, zoals het Waterhouderij Walcheren gebied, Hedwigepolder, Waterdunen en Rammegors, is de onderlinge afstand van de vlieglijnen verdicht naar 100 m. Op een vlieglijn is voor elke 4 m een meting uitgevoerd. Uniek is het meenemen in de resultaten van de onzekerheid van alle stappen tussen data-acquisitie en de uiteindelijke 3D zoet-brak-zout-verdeling. Daartoe zijn 600 realisaties uitgevoerd en uit dit ensemble zijn percentielen van de berekende chlorideverdelingen afgeleid (zie Delsman e.a., 2018 en Van Baaren e.a., 2018 voor meer details). Afbeelding 8 toont het gedetailleerde 2D-resultaat (50-percentiel) langs een vlieglijn waarop duidelijk de ruimtelijke variatie van de zoetwaterlenzen (blauwe kleuren) in een verder zoute ondergrond (geelrode

kleuren) zijn te zien. Hier zijn zelfs diepere zoetwatervoorkomens onder een zoute ondergrond (zogenaamde inversies) zichtbaar. Naast deze 2D-resultaten heeft FRESHEM ook een geïnterpoleerd 3D-beeld opgeleverd. Voor voxels van 50x50 m en 0,5 m dik is voor het gehele gebied een zoutgehalte bekend. Uit deze 3D-beelden zijn vervolgens verschillende grensvlakken geëxtraheerd. Het grensvlak van 1500 mg/l (50-percentiel) staat weergegeven in Afbeelding 8a en geeft een goede indicatie van de aanwezigheid en dikte van zoetwaterlenzen. De zoetwaterlenzen onder de duinen van Schouwen en kreekruigen (bijvoorbeeld op Walcheren) zijn goed zichtbaar. De FRESHEM-data zijn vrij toegankelijk: <https://www.zeeland.nl/water/zoet-water/zoet-zoutverdeling-zeeuwse-ondergrond>.



Afbeelding 7: De vlieglijnen waarvoor met behulp van Airborne-EM data over de zoet-zoutverdeling van de ondergrond is verzameld. Onderlinge afstand van de vlieglijnen varieert van 300 tot 100 m voor de interessegebieden. Op een vlieglijn is voor iedere 4 m een meting verricht.



Afbeelding 8: Enkele resultaten van het FRESHEM-project in Zeeland: (a) het $CI = 1500 \text{ mg/l}$ grensvlak (50-percentiel); (b) CI -concentratie in een 3D-presentatie van voxels ($50 \times 50 \times 0,5 \text{ m}$); (c) 2D-resultaat van de zoet-zoutverdeling (CI -concentratie) langs een vlieglijn (x -as: afstand (m), y -as: diepte (m NAP))

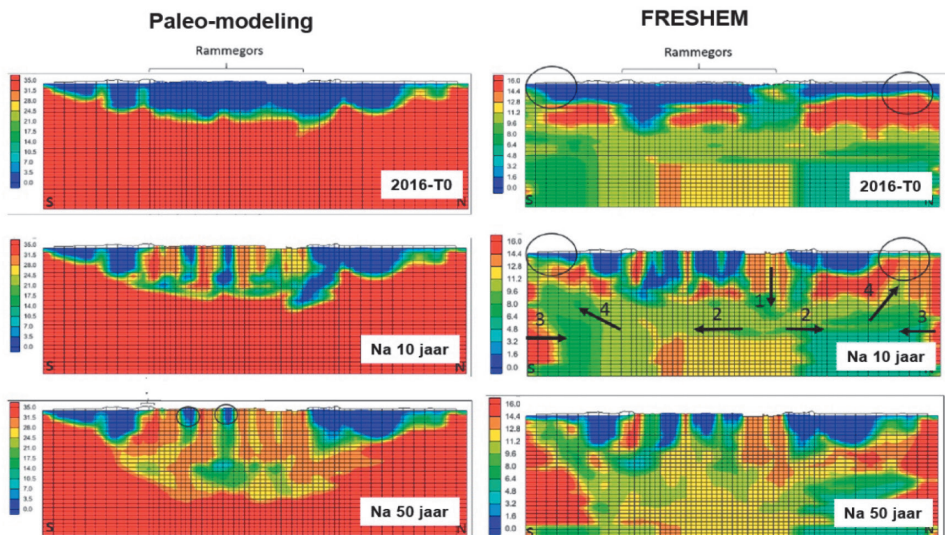
Complexiteit van modelleren met zoet en zout grondwater

Vergeleken met zoete grondwatersystemen, is het modelleren van gebieden met zout grondwater in de ondergrond extra complex. Dichtheidsverschillen zorgen voor een extra drijvende kracht voor stroming van water en er dient een term voor opdrrijving ('buoyancy') te worden toegevoegd in de verticale stromingscomponent. Daarnaast vindt (advectief, dispersief én diffusief) zouttransport plaats waardoor het dichtheidsveld continu verandert. Dit compliceert de modellering, en alles bij elkaar kan dit leiden tot lange rekentijden. Met onder meer parallelisatie van rekencodes (parallel SEAWAT, Verkaik e.a., 2018) kan dit probleem tegenwoordig worden ondervangen. Modelberekeningen worden uitgevoerd om effecten van ingrepen en maatregelen, klimaatverandering en zeespiegelstijging door te rekenen. Van belang daarbij is een goede schatting van de initiële (T0) zoet-zoutverdeling. De invloed daarvan op de gesimuleerde stroming en de toekomstige zoetzoutverdeling is significant. De zoet-zoutdata zoals verzameld in FRESHM zijn hierbij uiterst waardevol. Echter, het één-op-één overnemen van dit soort gedetailleerde gemeten zoetzoutverdelingen in een grondwatermodel als T0-situatie, zullen altijd leiden tot veranderingen in de gesimuleerde zoet-zoutverdeling die zijn toe te schrijven aan modelartefacten, in plaats van aan effecten van de ingreep, het klimaatscenario of aan autonome verzilting. Dit komt omdat de zoet-zoutverdeling (meestal) niet in evenwicht is met de modelrandvoorwaarden. Daarom is het van belang de grondwaterfluxen in het model zo goed mogelijk de werkelijkheid te laten representeren. Een kleine fout in deze fluxen heeft grote implicaties voor de zoet-zoutverdeling omdat deze verdeling een resultante is van tientallen jaren advectief-dispersief zouttransport. Het is daarom noodzakelijk om het grondwatermodel wat betreft de zoet-zoutverdeling zogezegd 'in te slingeren', ofwel een bepaalde historie in de grondwaterstroming mee te nemen in de modellering. Het model heeft een aanlooptijd nodig voordat het een dynamisch evenwicht heeft bereikt met de opgelegde rand- en beginvoorwaarden. We kunnen dit paleomodellering noemen en het hangt af van het type grondwatersysteem hoe lang terug in het verleden gemodelleerd moet worden voordat het model voldoende is ingespeeld. De gemeten zoet-zoutverdeling kan dan worden gebruikt als validatie c.q. kalibratie van het model. Zoals Delsman e.a. (2014) aantoonde, is de huidige zoet-zoutverdeling in West-Nederland sinds het begin van het Holoceen niet in evenwicht geraakt met de steeds veranderende randvoorwaarden, en dus ook nu nog niet in evenwicht. Het is voorlopig praktisch gezien niet haalbaar om voor regionale modelstudies terug te gaan tot bijvoorbeeld het begin van het Holoceen voor West Nederland, en er zijn zeker alternatieven. Bij het maken van modelkeuzes is het belangrijk inzicht te krijgen in de responstijd van een grondwatersysteem totdat een dynamische evenwichtssituatie is bereikt. Deze tijd geeft een indicatie hoe lang je terug moet in de tijd. Zo is de T0-verdeling van zoetwaterlenzen in een zoute ondergrond onder duinen of kreekruggen zeer goed met paleomodellering te verkrijgen door het relatief snelle evenwicht dat wordt bereikt; ook eerste orde analytische vergelijkingen kunnen nuttig zijn.

De T0 zoet-zoutverdeling van Rammegors: paleomodellering versus FRESHM

Voor het Rammegors-gebied (nabij Sint Philipsland) is een 3D dichtheidsafhankelijk zouttransportmodel (opgebouwd in SEAWAT) opgezet voor het voorspellen van effecten

op de zoetwatervoorraad in het omringende landbouwgebied als gevolg van het herstel van het getijdengebied. Er zijn twee verschillende methoden toegepast voor het meenemen van de T0 zoet-zoutverdeling in de modellering (America e.a., 2018). Vóór 1970 was Rammegors nog een actieve zeearm van de Oosterschelde, waarna het in 1970 werd afgesloten en zich een zoetwaterbel kon ontwikkelen die het aanwezige zoute grondwater verdrong. In het kader van herstel van getijdenatuur is in 2016 de verbinding met de Oosterschelde weer in werking gesteld. Sinds 2016 stroomt weer zeewater het Rammegors in en vindt infiltratie van zout water plaats in de aanwezige zoetwaterbel. Deze situatie is vergelijkbaar met de Holocene transgressies, maar dan in het klein. De volgende twee manieren van modellering zijn toegepast: (1) paleomodellering, waarbij de geschetste historische ontwikkeling van Rammegors is gesimuleerd; (2) het gebruik van FRESHEM-resultaten uit 2015 als T0-situatie. De ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling na 10 en 50 jaar en de T0-situatie staan voor beide methoden weergegeven in afbeelding 9. Te zien is dat verziltingsprocessen in het natuurgebied en voor het omringende landbouwgebied tussen de methoden significant verschillen. Met FRESHEM ligt de zoet-zoutverdeling dicht bij de werkelijke T0-situatie maar lijken er modelartefacten op te treden omdat er nog geen dynamisch evenwicht is bereikt met de modelrandvoorwaarden. Dit geldt bijvoorbeeld voor de omcirkelde locaties (afbeelding 9) waar zoetwaterlenzen al na 10 jaar verdwijnen op grotere afstand van Rammegors en dus niet het gevolg zijn van veranderingen in Rammegors. De paleomodellering laat geen modelartefacten zien en de processen van zoutwaterinfiltratie als gevolg van binnestromen van zeewater in Rammegors zijn duidelijk zichtbaar. Echter, de gemodelleerde T0-situatie wijkt af van de (werkelijke) gemeten situatie. Een combinatie van paleomodellering en het gebruik van metingen lijkt dan ook een geschikte methode om effecten op zoet-zoutverdelingen te simuleren.



Afbeelding 9: De ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling voor het natuurgebied Rammegors en omringende landbouwgebied na herstel van de verbinding met de Oosterschelde, op basis van (1) paleomodellering (modelleren van de historie van Rammegors) en (2) het gebruik van een gemeten zoet-zoutverdeling als T0-situatie (op basis van FRESHEM). Let op: de legenda-eenheid van de paleomodellering (TDS) verschilt van die van FRESHEM (g/l Cl).

Andere deltagebieden

Het langetermijngeheugen van het Nederlands grondwatersysteem is niet uniek; ook in andere deltagebieden zijn vergelijkbare observaties gedaan. Zo is bijvoorbeeld bijna de helft van het grondwater in de Paredelta in China nog zout door de Holocene transgressie (Sang e.a., 2018). De zoutwaterzone veroorzaakt door deze transgressie reikt tot 75 km landinwaarts (Wang & Jiao, 2012). Ook in de Rode Rivierdelta (Vietnam) is de Holocene transgressie tot bijna 75 km landinwaarts nog zichtbaar in de toen afgezette mariene kleilagen. Dit zout lekt langzaam weg naar de onderliggende watervoerende pakketten (Larsen e.a., 2017). In de Nijldelta-aquifer wordt op 600 meter diepte hypersalien grondwater gevonden, wat potentieel bijna zes miljoen jaar oud kan zijn (Van Engelen e.a., 2018). Ook op minder grote diepte (<200 m) wordt tot bijna 70 km landinwaarts zout grondwater aangetroffen dat zijn oorsprong lijkt te hebben gedurende de Holocene transgressie van 8000 jaar geleden (Geriesh e.a., 2015). Momenteel wordt door Joeri van Engelen (PhD-student UU) met numerieke simulaties onderzocht of deze verklaring fysisch mogelijk is.

De genoemde delta's herbergen allen miljoenensteden, respectievelijk Hanoi, Hong Kong en Cairo, waardoor de beschikbaarheid van zoet grondwater van groot belang is. Een wereldwijde inventarisatie van Larsen e.a. (2017) wijst op in ieder geval nog 14 andere grote deltagebieden waar vergelijkbare processen spelen en de zoetwatervoorziening door bevolkingsgroei, klimaatverandering en zeespiegelstijging onder grote druk staan. Onze kennis en kunde die wordt ontwikkeld in onze Nederlandse delta is dan ook uitstekend toepasbaar voor deze dichtbevolkte deltagebieden.

Conclusies

De zoet-zoutverdeling in Nederland heeft een groot langetermijngeheugen en is voor een belangrijk deel bepaald door de paleogeografische ontwikkeling van Nederland sinds het begin van het Holoceen. Gedurende transgressies infiltreerde zout water in de ondergrond, tijdens veenvorming kon zoet water infiltreren. In West-Nederland is de huidige zoet-zoutverdeling niet in evenwicht met de heersende hydrologische condities. Hier hebben we te maken met autonome verzilting. Wellen doorbreken de zoet-zoutverdeling in West-Nederland en brengen versneld het historische zoute transgressiewater naar het oppervlak. De zoet-zoutverdeling in de recente transgressiegebieden (Zeeland, Noord-Nederland) is redelijk in evenwicht met de omgevingsfactoren. De resultaten van het FRESHEM-Zeeland project laten zien dat airborne-elektromagnetische meettechnieken zeer geschikt zijn om voor een groot gebied in relatief korte tijd de zoet-zoutverdeling in beeld te brengen.

De initiële (T0) zoet-zoutverdeling is essentieel bij grondwatermodelleringen in zoute gebieden. Een zoet-zoutmodel heeft meestal een lange aanloopfase nodig voordat de T0-zoet-zoutverdeling in dynamisch evenwicht is met de heersende rand- en beginvoorwaarden. Deze aanloop is noodzakelijk om modelartefacten te voorkomen en juiste voorspellingen te kunnen doen. Bij een goede afweging van de modelleerkeuzes is kennis van het type grondwater systeem onontbeerlijk. Een combinatie van paleomodellering en gebruik van metingen (bijvoorbeeld FRESHEM) wordt aanbevolen. Daarnaast hebben gemeten T0-verdelingen een grote meerwaarde bij de kalibratie en validatie van grondwatermodellen.

The long-term memory of the fresh-salt distribution

This article describes the development of the fresh-salt distribution in the subsoil of the Netherlands, which is primarily determined by the paleogeographic development during the Holocene. Two types of groundwater systems are described: western Netherlands with autonomous salinization and saline seepage via boils, and Zeeland for which three types of freshwater lenses are being described. We show the application of airborne electromagnetics for mapping the fresh-salt distribution in the subsoil through the example of project FRESHM-Zeeland. Subsequently, the modeling of the initial fresh-salt distribution is discussed. The combination of paleomodelling and measurements seems an appropriate method to simulate the initial fresh-salt distribution and changes due to interventions, climate change and sea level rise.

Literatuur

America, I., De Louw, P.G.B., Bier, G. en Van der Zee, S.E.A.T.M. (2018). Influence of tides, bathymetry, lithology and regional flows on the salinization process in nature area the Rammegors. E3S Web Conf. Volume 54, 2018. 25th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM 2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185400001>.

Boukes, H., Caljé, R. en Medenblik, J. (2017). Oriënterende verziltingsberekeningen Fryslân. Stromingen nummer 3 (2017).

De Louw, P.G.B. (2013). Saline seepage in deltaic areas. Preferential groundwater discharge through boils and interactions between thin rainwater lenses and upward saline seepage. Vrije Universiteit Amsterdam, Academisch proefschrift, ISBN/EAN 9789461085429.

De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Stuyfzand, P.J., en 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, 494-506.

De Louw, P.G.B., Van de Velde, Y., en Van der Zee, S.E.A.T.M. (2011a). Quantifying water and salt fluxes in a lowland polder catchment dominated by boil seepage: a probabilistic end-member mixing approach. Hydrology and Earth System Sciences 15, 2101-2117.

De Louw, P.G.B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B.R., Gunnink, J., Van Baaren, S.E., en Oude Essink, G.H.P. (2011b). Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. Hydrology and Earth System Sciences 15, 3659-3678.

De Louw, P.G.B., Vandenbohede, A., Werner, A.D., en Oude Essink, G.H.P. (2013). Natural saltwater upconing by preferential groundwater discharge through boils, *Journal of Hydrology* 490, 74-87.

Delsman, J.R. (2015). Saline groundwater - surface water interaction in coastal lowlands, PhD thesis VU University Amsterdam, Amsterdam, 194 pp. Academisch proefschrift.

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

Delsman, J., Van Baaren, E.S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karaoulis, M.C., Pauw, P., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P.G.B., Gunnink, J.L., Dube-laar, W., Menkovic, A., Steuer, A., Meyer, U., Revil, A., en Oude Essink, G.H.P. (2018). Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. *Environ. Res. Lett.* 13. doi:10.1088/1748-9326/aad19^e

Drabbe, J., Badon Ghijben, W. (1889). Nota in verband met de voorgenomen putbooring nabij Amsterdam. *Tijdschr. Van Koninklijk Instituut Van Ingenieurs* 5, 8-22.

Faneca Sánchez, M., Gunnink, J. L., van Baaren, E. S., Oude Essink, G. H. P., Siemon, B., Auken, E., Elderhorst, W., en De Louw, P.G.B. (2012). Modelling climate change effects on a Dutch coastal groundwater system using airborne electromagnetic measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 4499-4516.

Geriesh, M. H., Balke, K. D., El-Rayes, A. E., en Mansour B. M. (2015). Implications of climate change on the groundwater flow regime and geochemistry of the Nile Delta, Egypt. *Journal of Coastal Conservation* 19, 589-608.

Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *J. Gasbeleucht. Wasserversorgung* 44, 815-819.

Verkaik, J., Huizer, S., Van Engelen, J., Ram, R., Vuik, K., en Oude Essink, G.H.P. (2018). Parallel computing with SEAWAT, in: 25th Salt Water Intrusion Meeting, Gdansk, Poland.

Larsen, F., Tran, L.V., Van Hoang, H., Tran, L.T., Christiansen, A.V., en Pham, N.Q. (2017). Groundwater salinity influenced by Holocene seawater trapped in incised valleys in the Red River delta plain. *Nature Geoscience* 10

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., en Schoevers, M. (2014). GO-FRESH: Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening, KvK 151/2014, ISBN EAN 978-94-92100-12-2, 84 p.

- Post, V.E.A.**, (2004). Groundwater Salinization Processes in the Coastal Area of The Netherlands due to Transgressions during the Holocene. PhD thesis, Free University Amsterdam, 138pp.
- Post, V.E.A. en Kooi, H.** (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), pp. 549-559.
- Pauw, P.S., Van Baaren, E.S., Visser, M. De Louw, P.G.B., en 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.
- Sang, S., Zhang, X., Dai, H., Hu, B. X., Ou, H., en Sun, L.** (2018). Diversity and predictive metabolic pathways of the prokaryotic microbial community along a groundwater salinity gradient of the Pearl River Delta, China. *Scientific Reports*, 8(1), 17317. doi:10.1038/s41598-018-35350-2
- Schultz, E.**, (1992). Water management of the drained lakes in the Netherlands, *Academisch Proefschrift*, 507pp., TUDelft.
- Stuyfzand, P.J.** (1993). Hydrochemistry and Hydrology of the Coastal Dune Area of the Western Netherlands. PhD thesis, Free University Amsterdam, ISBN 90-74741-01-0, 366 pp.
- Van Baaren, E.S., Delsman, J.R., Karaoulis, M., Pauw, P.S., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Dabekaussen, W., Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Siemon, B., Steuer, A., en Meyer, U.** (2018). FRESHM Zeeland - FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland, Deltareport 1209220. Utrecht, Netherlands.
- Van Engelen, J., Oude Essink, G.H.P., Kooi, H., en Bierkens, M.F.P.** (2018) On the origins of hypersaline groundwater in the Nile Delta aquifer. *Journal of Hydrology* 560, 301-317.
- Vos, P.C., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T., en Van der Meulen, M.J.** (2011). Atlas van Nederland in het Holoceen. Amsterdam, 93 pp.
- Wang, Y., Jiao, J.J.** (2012) Origins of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China. *Journal of Hydrology*, 438-439, 112-124.
- Zaadnoordijk, W.J., Velstra, J., Vergroesen, A.J.J., en Mankor, J.** (2009). Groot Mijdrecht: inzicht in functioneren wellen. *Stromingen* 2009-2.

