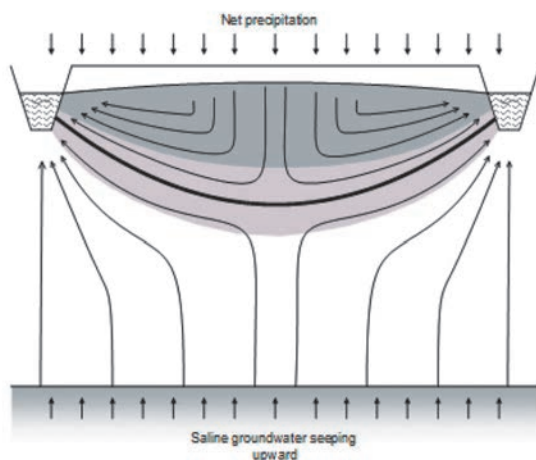


Dynamiek van regenwaterlenzen op zout kwelwater

Sara Eeman¹

Inleiding

In dichtbevolkte kustgebieden is zoet water meestal schaars en het grondwater veelal brak of zout. Waar het landoppervlak op of net onder de zeespiegel ligt, zijn landbouw en zoetwaternatuur vaak afhankelijk van dunne zoetwaterlenzen die zich als gevolg van een neerslagoverschot vormen op het zoute grondwater (Afbeelding 1). Het begrijpen van de dynamiek van zoetwaterlenzen is essentieel voor een duurzame voedselproductie en natuurontwikkeling onder veranderende omstandigheden, zoals zeespiegelstijging en klimaatverandering. De mengzone tussen een regenwaterlens en het zoute grondwater is relatief dik, waardoor het denkmodel van een scherp grensvlak niet realistisch is en het gedrag van de mengzone zelf ook van belang is. In mijn promotieonderzoek heb ik daarom sturende factoren alsmede dynamiek en bijbehorende mengzone van dunne lenzen onderzocht.



Afbeelding 1: Dunne regenwaterlens op zout kwelwater, schematisch. Bron: Eeman e.a., 2011.

¹ Van Hall Larenstein, Velp, (sara.eeman@hvhl.nl).

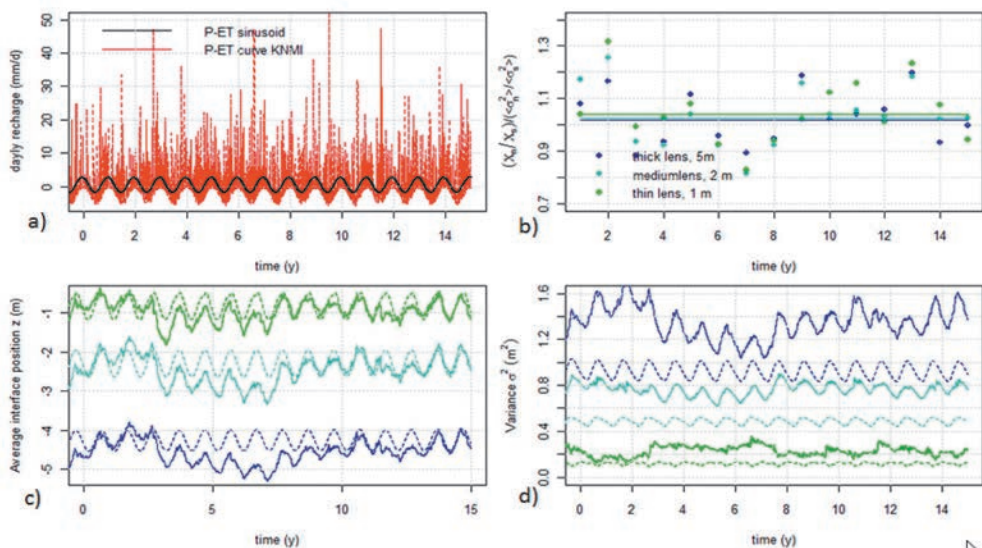
Stationair gedrag van regenwaterlenzen (Eeman e.a., 2011)

In mijn onderzoek, ben ik bij de basis begonnen: Hoe ontwikkelt een regenwaterlens zich vanaf een situatie waarin al het grond- en bodemwater zout is? Om het effect van alle parameters die de dikte van de lens en de mengzone beïnvloeden te onderzoeken, heb ik gebruikt gemaakt van dimensieloze parametergroepen, die verschillende aspecten van het gedrag van de lens beschrijven. De groepen die de neerslag-kwelratio en de invloed van dichtheidsverschillen beschrijven, hebben een substantieel effect op de dikte van de lens en de mengzone. Zoals te verwachten, wordt de dikte van de mengzone sterk beïnvloed door dispersie zolang de lens zich ontwikkelt. Voor een stabiele lens geldt dat de dikte van de mengzone wordt beïnvloed door difussie. In situaties met hoge kwelfluxen kan de lensdikte geschat worden met een analytisch model (Maas, 2007) met als onafhankelijke variabelen de netto neerslag, de kwelflux vanuit het dieper gelegen zoute grondwater, het zoutgehalte van het kwelwater en de afstand tussen de drainagemiddelen. Wanneer de kwelflux erg klein is, wordt deze benadering minder nauwkeurig en gaat hij afwijken van numerieke oplossingen. Dit komt omdat in het analytische model wordt aangenomen dat zout grondwater stil staat wanneer er geen kwel is. De dikte van de mengzone is niet met bestaande oplossingen te schatten. Bij het numeriek berekenen van een lens en de mengzone blijkt de dikte van de mengzone, behalve van bovengenoemde parametergroepen, sterk afhankelijk van de afstand tot een drain of waterloop. Het dunner worden van de mengzone richting het drainagemiddel wordt veroorzaakt door convergerende stroming. Dit effect blijkt sterker dan de mechanische dispersie die optreedt als gevolg van hogere stroomsnelheden in de richting van drainagemiddelen.

Dynamische aspecten (Eeman e.a., 2012)

Na de analyse van het stationaire gedrag van neerslaglenzen, heb ik het dynamische gedrag onderzocht. Specifiek heb ik gekeken hoe de lens en de overgangszone beïnvloed worden door neerslagvariatie (variërend van een natuurlijk patroon tot een jaarlijkse sinus, Afbeelding 2a). Een opvallend resultaat was dat de gemiddelde lensdikte nauwelijks afhangt van buien of hete dagen. De minimale en maximale dikte van de lens worden daarom ook nauwelijks door deze weervariaties beïnvloed en kunnen gerelateerd worden aan de gemiddelde lensdikte en de jaarlijkse amplitude van netto neerslag.

De dikte van de mengzone is af te leiden uit de verticale verplaatsing in de tijd van het midden van de mengzone (afbeelding 2b en c). Hoe meer die op en neer beweegt, als gevolg van afwisselend neerslag en verdamping, des te meer worden neerslag en kwelwater gemengd, waardoor de mengzone dikker wordt. Veranderingen van deze dikte zijn analytisch te bepalen (afbeelding 2d), maar dan is wel een numeriek model of een dataset als referentie nodig om de absolute dikte van de mengzone te kunnen berekenen. Numerieke simulaties geven aan dat korte, heftige buien vooral invloed hebben op de dikte van de mengzone en veel minder op de dikte van de lens zelf. Volgens veldwaarnemingen (De Louw et al, 2013) is de invloed van deze buien alleen te vinden in het bovenste gedeelte van de lens, bij de grondwaterspiegel. Omdat op de onderzoekslocaties het bovenste grondwater al deel uitmaakt van de mengzone (er is daar weinig tot geen volledig zoet grondwater, Afbeelding 3), klopt de conclusie dat alleen de mengzone wordt beïnvloed door individuele buien.



Afbeelding 2: a) Netto neerslag sinus (zwart) en natuurlijk patroon b) Ratio tussen afstand die het centrum van de mengzone aflegt en variantie per jaar (stippen) en gemiddeld over 15 jaar (lijnen). c) Diepte van het centrum van de mengzone voor 15 jaar dagelijkse netto neerslag, (sinus: stippellijn, natuurlijk: doorgetrokken lijn) en d) de bijbehorende variantie voor lenzen met verschillende gemiddelde dikte. Bron: Eeman e.a. 2012.

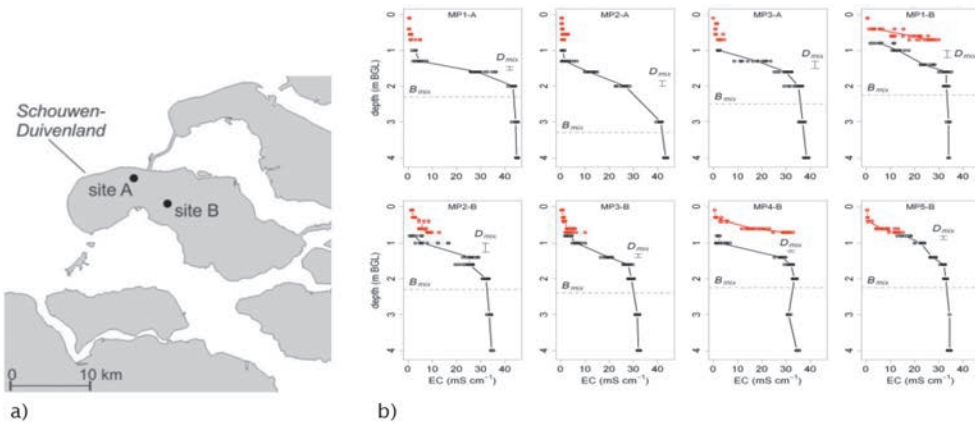
Om demping en vertraging van veranderingen in de dikte van een lens als reactie op klimaatverandering (oftewel verandering van de gemiddelde netto neerslag en infiltratie) te kunnen voorspellen, hebben we de convolutietheorie gebruikt. Door de impulsresponsfunctie voor een dunne regenwaterlens te bepalen, zijn reacties van dunne lenzen voor uiteenlopende systemen snel te berekenen. De vertraging komt hierbij zoals verwacht steeds uit rond de 25% van de frequentie van de neerslag-variantie. Dikteverandering is vooral afhankelijk van de amplitude en alleen bedreigend voor de wortelzone bij lenzen van minder dan 1 m dik. De meest ondiepe positie van het zoute water en het moment dat deze optreedt, kunnen gebruikt worden om gevoeligheid op grotere schaal te inventariseren.

Regenwaterlenzen op zoute kwel in het veld (De Louw e.a., 2013)

Uit veldwaarnemingen van twee onderzoeklocaties op Schouwen-Duivenland (Afbeelding 3a) bleek dat bodemgelaagdheid een grote rol speelt bij de vorming van regenwaterlenzen. Een slecht doorlatende laag verhindert dat regenwater dieper infiltreert dan op basis van de neerslag-kwel ratio en dichtheidsverschillen verwacht kan worden. Ook blijkt het effect van dichtheidsverschillen op deze locaties aanzienlijk kleiner te zijn dan het effect van de kwelflux. Daarom is het voor een "Hollands profiel" niet noodzakelijk dichtheidsverschillen mee te nemen in het modelleren van de veldsituatie.

De temporele variatie van dunne lenzen is gemeten en gemodelleerd voor een periode van twee jaar op twee verschillende gedraineerde landbouwpercelen. Maandelijks metingen van zoutprofielen op verschillende afstanden van drains en sloten, gecom-

bineerd met dagelijkse gegevens voor weer en grondwaterstand, laten zien dat de dynamiek erg afhankelijk is van de diepte (afbeelding 3b). Terwijl het dynamische bovenste gedeelte van de lens wordt gedomineerd door neerslag en verdamping, zijn in het onderste deel van de lens alleen kleine, trage oscillaties zichtbaar. De observaties in 3b kunnen modelmatig worden gesimuleerd en blijken dan het gevolg van het gedempte, vertraagde effect van oscillerende stroomrichting bovenin de lens en de constante opwaartse kwelflux. Deze kleine bewegingen bepalen de mate van mengen van neerslag en kwelwater. De verlaging van het zoutgehalte in het bovenste deel van de lens na een bui is klein in vergelijking met de hoeveelheid regen (meetbaar in verandering van de grondwaterstand). Dit gedempte effect wordt veroorzaakt door het uitspoelen van zout water, dat achterblijft in de onverzadigde zone op het moment dat de grondwaterstand zakt. Dit water mengt met neerslagwater, waardoor het zoutgehalte van het bovenste grondwater maar langzaam terugloopt.



Afbeelding 3: a) de onderzoeklocaties. b) gemeten zoutprofielen op individuele meetpunten op deze locaties (A en B) in bodemvocht (rood) en grondwater (zwart). De lijnen geven mediaanwaarden aan, de punten zijn verschillende momentopnamen. D_{mix} en B_{mix} staan voor respectievelijk het midden en de onderkant van de zoet-zout mengzone. Bron: De Louw e.a. 2013.

Duale porositeit is van invloed op het zoutgehalte van het bodemwater. Capillaire opstijging van relatief zout water in droge perioden spoelt niet direct uit tijdens de eerstvolgende bui. Dit komt doordat regenwater grotendeels naar beneden stroomt via macroporiën, zoals scheuren in klei- of leemhoudende bodems. Daardoor is na een droge periode het bovenste grondwater zoeter dan de capillaire zone op dat moment (voorbeelden in afbeelding 3, rechts, meetpunten 1B, 2B, en 4B). Dit kan effect hebben op de waterkwaliteit in de wortelzone en daarmee op de ontwikkeling van vegetatie.

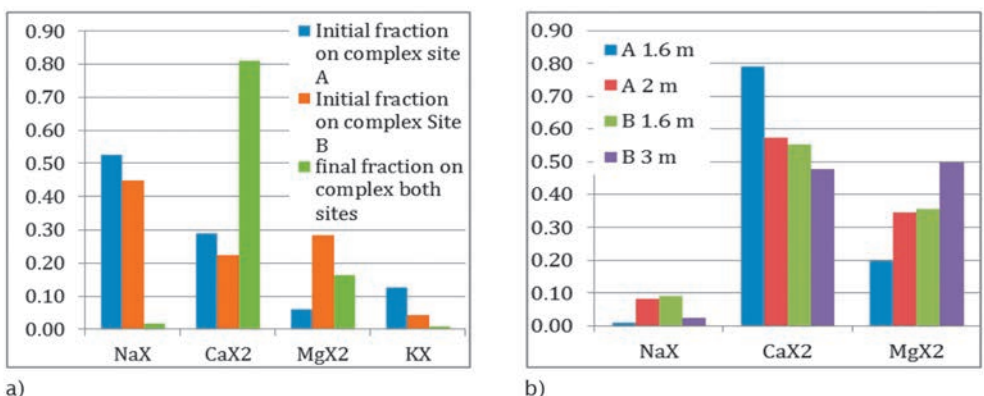
Preferente stroming in scheurvormende bodems biedt ook een verklaring voor de snelle afname van het zoutgehalte in drainwater na individuele buien. De samenstelling van het drainagewater wordt zowel bepaald door infiltrerend regenwater als door het water in lens en mengzone, met een zoutgehalte dat afhangt van de precieze plaats (in het geval van de mengzone) waar het water vandaan komt. Dit zorgt voor een zeer dynamische kwaliteit van het drainagewater op een tijdschaal van uren tot dagen. Dit effect is van belang voor het permanent voorkomen van dunne lenzen.

Snelle afvoer van zoetwater is hiervoor een bedreiging, omdat de lens dan niet maximaal aangroeit in natte perioden.

Kationen-uitwisseling rond het zoet-zout grensvlak (Eeman e. a., 2016)

Het proces van kationen-uitwisseling in regenwaterlenzen op zoute kwel begint bij de ontwikkeling van een lens in een bodem die geochemisch in evenwicht is met zout grondwater. Tijdens de eerste fase van de ontwikkeling wordt dit proces gekarakteriseerd door de zoutschok, veroorzaakt door het grote concentratieverschil tussen regenwater en kwelwater. Het poriewater verzoet snel, waarbij het watertype verandert van natrium en magnesium gedomineerd naar calcium gedomineerd. Dit effect wordt versterkt als er schelpen in de onverzadigde zone aanwezig zijn die het regenwater verrijken met calcium voordat dit het grondwater bereikt.

Veranderingen in het bodemcomplex verlopen veel trager dan die van het poriewater, omdat het aantal kationen dat aan de bodem is geadsorbeerd groot is ten opzichte van het aantal dat in regenwater aanwezig is. De lens is dan ook binnen enkele tot enkele tientallen jaren (afhankelijk van dikte en neerslagoverschot) gevormd, terwijl de bodemchemie nog nauwelijks veranderd is ten opzichte van de beginsituatie. Initieel wisselen zowel calcium als magnesium aan het complex uit met natrium. Op de lange termijn wordt magnesium weer van het complex gestoten door calcium. Het evenwicht aan het bodemcomplex wordt na een tijdsbestek van ordegrrootte honderden jaren bereikt voor de ondiepe systemen (enkele meters, Afbeelding 3b) die in Zeeland zijn onderzocht. De snelheid waarmee het evenwicht wordt bereikt is afhankelijk van de jaarlijkse netto neerslag, terwijl dagelijkse weerveranderingen geen rol van betekenis spelen. Ook de invloed van buisdrainage blijkt relatief beperkt; Alleen heel dicht rond de drains vindt minder menging plaats en recht onder de drain vindt nauwelijks ionenuitwisseling plaats. Op slechts 1 tot 2 meter afstand van de drain is de mengzone al praktisch horizontaal. Daar heeft de horizontale waterstroming naar de drain nauwelijks effect op het mengen van zoet en zout water.

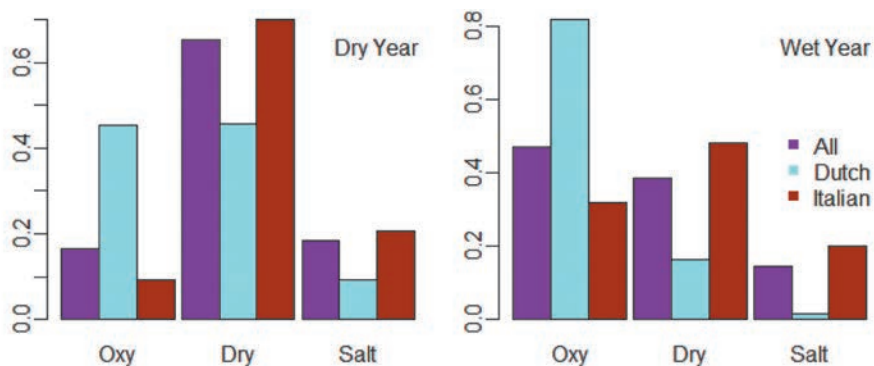


Afbeelding 4: a) Equivalente fracties van Na⁺, Mg²⁺, K⁺ en Ca²⁺ aan het complex, in evenwicht met kwelwater (blauw en oranje) en onverzadigde zone water (groen). b) de huidige situatie van deze fracties op beide onderzoek locaties op twee dieptes. NaX en CaX₂ zitten duidelijk tussen evenwicht met kwelwater en onverzadigde zone water. Mg X₂ laat hogere niveaus zien, in lijn met preferente uitwisseling van Na⁺ met Mg²⁺, gevolgd door Mg²⁺ voor Ca²⁺. Bron: Eeman e.a., 2016.

De ionenuitwisseling met het bodemcomplex wordt alleen veroorzaakt door de kleine verticale component van de grondwaterstroming. Vergelijking van het numerieke model met analyses op grondmonsters voor beide locaties in Zeeland bevestigen de verwachte toename van calcium, de afname van natrium en de tijdelijke toename van magnesium aan het complex (afbeelding 4b) rechts). Beide locaties laten zien dat in het bovenste gedeelte van de lens het bodemcomplex in evenwicht raakt met regenwater, alhoewel dit na meer dan 100 jaar nog niet is bereikt (waarbij aangetekend moet worden dat door veranderingen in bedijking en waterbeheer door de tijd dit getal niet heel precies kan worden vastgesteld). Daarnaast zijn verschillen in kwelwaterkwaliteit (afbeelding 4a) tussen de locaties nog steeds zichtbaar in de samenstelling van het bodemcomplex, ondanks dat de verzoeting in beide gevallen al eeuwen geleden is begonnen. De invloed van veertig jaar drainage daarentegen, die voor locatie B goed bekeken kon worden, is nauwelijks zichtbaar in de samenstelling van het complex.

Zoute kwel en vegetatie

Ten slotte heb ik gekeken naar de invloed van zout grondwater op de ontwikkeling van vegetatie. Deze ontwikkeling is voor twee klimaten gesimuleerd bij verschillende combinaties van vegetatietype, bodemsoort, zoutgehalte van het grondwater en grondwaterstand. De relatieve invloed van deze factoren op de zoetwaterbeschikbaarheid en daaraan gerelateerde groei van de planten is bepaald. Hierbij hebben we de effecten van zoutstress op planten bepaald en vergeleken met de effecten van droogte- en zuurstofstress (onder te natte omstandigheden). Het totaalbeeld dat hieruit volgde is weergegeven in Afbeelding 5.



Afbeelding 5: Staafdiagram van de relatieve hoeveelheden stress veroorzaakt door zuurstof, droogte en zout, gedeeld door de optelsom van deze stressfactoren. Stress is hierbij gedefinieerd als opbrengstverlies ten opzichte van maximaal mogelijke opbrengst. Dit is gemiddeld voor alle simulaties en per klimaat. Bron: Eeman, 2017.

Bodemsoort en klimaat blijken de belangrijkste factoren voor de beschikbaarheid van zoet water voor de plant. Daarnaast is zoutschade in sommige gevallen weliswaar substantieel, maar klein in vergelijking met de effecten van droogte of zuurstofgebrek. De zouttolerantie van de planten is nauwelijks van invloed op de groei. Dit komt doordat binnen dit onderzoek het grondwater altijd zouter was dan de meeste zouttolerante gewassen kunnen verdragen, en schade dus altijd optreedt wanneer zout

water de wortelzone bereikt. In gebieden waar grondwater minder zout is, zou het vergroten van de zouttolerantie van gewassen wel kunnen leiden tot verduurzaming van de landbouw. In gebieden met erg zout grondwater lijken adequaat bodembeheer en in mindere mate grondwaterbeheer effectievere instrumenten.

Conclusies en consequenties voor waterbeheer

De resultaten van bovenstaande onderzoeken kunnen op verschillende manieren worden toegepast in het waterbeheer. Allereerst zijn de snelle analytische methodes om de dikte en dikteverandering van lenzen en mengzones te voorspellen een nuttig hulpmiddel om effecten van klimaatverandering of waterhuishoudkundige maatregelen op de schaal van polders te kunnen voorspellen. Pauw et al. (2014) hebben hier vervolgstappen in gezet. Ook het permanent voorkomen van lenzen kan snel ingeschat worden, waarmee kwetsbare gebieden te identificeren zijn. Stofberg et al. (2016) hebben hiervoor een eerste methode ontwikkeld.

Gebaseerd op bovenstaande resultaten is niet te verwachten dat laaggelegen polders met zout kwelwater binnenkort geheel ongeschikt worden voor zoetwatervegetatie en landbouw. Wel neemt de kans toe dat zout grondwater de wortelzone bereikt tijdens droge periodes, wat droogteschade steeds vaker zal verergeren. Bodemverbeterende maatregelen voor het vergroten van het waterbergend en infiltrerend vermogen van bodems kunnen de kwetsbaarheid van gewassen voor verzilting verminderen, waarmee hun effectiviteit groter wordt dan wanneer alleen naar droogtebestrijding wordt gekeken.

Dit extended abstract betreft een samenvatting van het proefschrift "Dynamics of rainwater lenses on upward seeping saline groundwater", verdedigd op 25 januari 2017 aan Wageningen UR. De volledige tekst van dit proefschrift, geschreven onder begeleiding van Prof. Sjoerd van der Zee en Prof. Toon Leijnse, is te vinden op <http://dx.doi.org/10.18174/390156>.

Literatuurlijst

De Louw, P.G.B., S. Eeman, E. Vermue, G.H.P. Oude Essink, V.E.A. Post (2013) Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field; in: Journal of Hydrology, vol 501, pag 133-145.

Eeman, S., A. Leijnse, P.A.C. Raats en S.E.A.T.M. van der Zee (2011) The transition zone between a fresh water lens and underlying saline groundwater; in: Advances in Water Resources, vol 34, pag 291-302.

Eeman, S., S.E.A.T.M. van der Zee, A. Leijnse, P.G.B. de Louw en C. Maas (2012) Response to recharge variation of thin rainwater lenses and their mixing zone with underlying saline groundwater; in: Hydrology and Earth System Sciences, vol 16, pag 3535-3549.

Eeman, S., P.G.B. de Louw en S.E.A.T.M. van der Zee (2016) Cation exchange in a temporally fluctuating thin fresh-water lens on top of saline groundwater; in: Journal of Hydrogeology, pag 1-19.

Eeman, S. (2017) Dynamics of rainwater lenses on upward seeping saline groundwater; Thesis Wageningen UR.

Maas, C. (2007) Influence of climate change and sea level rise on a Ghijben Herzberg lens; in: Journal of Hydrology, vol 347, pag 223-228.

Pauw, P.S., S.E.A.T.M. van der Zee, A. Leijnse, J.R. Delsman, P.G.B. de Louw, W.J. de Lange, G.H.P. Oude Essink (2014) Low-resolution modeling of dense drainage networks in confining layers; in: Groundwater, vol 53(5), pag 771-781.

Stofberg, S.F., G.H.P. Oude Essink, P.S. Pauw, P.G.B. de Louw, A. Leijnse, S.E.A.T.M. van der Zee (2016) Fresh water lens persistence and root zone salinization hazard under temperate climate; in: Water Resources Management, doi: 10.1007/s11269-016-1315-9.

Dynamics of rainwater lenses on upward seeping saline groundwater

Fresh water is generally a limited resource in densely populated coastal areas. In low-lying areas, groundwater is often saline and both agriculture and fresh water nature depend on a thin lens of rainwater that is formed by precipitation surplus on top of saline, upward seeping groundwater. Understanding the dynamics of such lenses and the associated mixing of fresh and saline water is vital for sustainable food production and development of natural vegetation and biodiversity under changing conditions like sea level rise and climate change. In this extended abstract, I present a summary of my thesis "Dynamics of rainwater lenses on upward seeping saline groundwater" defended on January 25 2017 at Wageningen UR. The complete thesis can be found at: <http://dx.doi.org/10.18174/390156>
