

## De invloed van verdamping op zoetwaterlenzen in droge laaglandgebieden

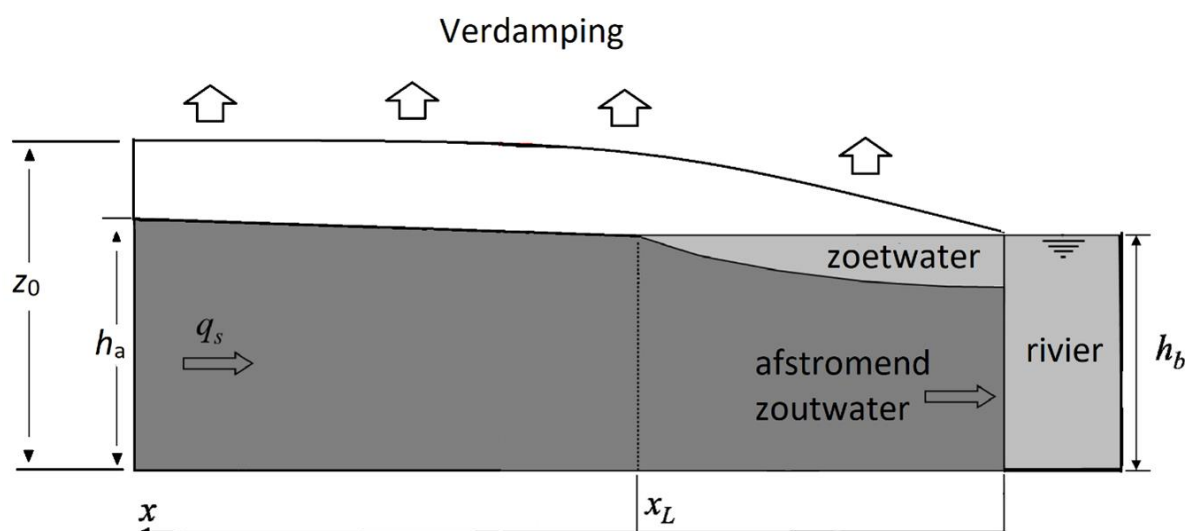
*Ilja America, Sjoerd van der Zee (Wageningen University & Research), Chenming Zhang (University of Queensland, Australië), Adrian D. Werner (Flinders University, Australië)*

**Veel van het gepubliceerde onderzoek naar zoetwaterbellen in de duinen en zoetwaterlenzen in het achterland richt zich op het verzadigde waterpakket. Dit onderzoek laat zien dat processen in de onverzadigde zone en atmosfeer ook een belangrijke invloed kunnen hebben op de verschijnselen in het verzadigde grondwater.**

Zoetwaterlenzen komen veelvuldig voor aan de kust of bij eilanden, drijvend op zout grondwater uit de zee. Daarnaast zijn er gebieden met coninaat zout grondwater ('fossiel' poriewater dat gevangen zit onder een ondoorlatende laag) of grondwater dat zout is als gevolg van verdamping. Daar kunnen zoetwaterlenzen ontstaan onder invloed van neerslag [1] of in de uiterwaarden daar waar rivieren door deze gebieden stromen [2].

In gebieden waar zout in de ondergrond voorkomt zijn aanpassingen van verdampingsfluxen nodig. Verdamping van een verzilt oppervlak veroorzaakt namelijk de opeenhoping van zout in ondiep poriewater. Als de oplosbaarheid van de zouten overschreden wordt, kan dit leiden tot het neerslaan van zout. Deze zoutneerslagen aan het oppervlak kunnen een extra weerstand voor verdamping veroorzaken. Het is daarom van belang dat hier rekening mee gehouden wordt bij het modelleren van deze processen.

In dit onderzoek is het effect bestudeerd van verdamping van een kale bodem op de zoet/zoutwaterhuishouding in riviervlaktes in (extreem) droge gebieden, zoals bij het Murray-Darling-stroomgebied in Australië. Hierbij zijn de zoutaccumulatie en het effect op de verdamping meegenomen in de modellering. Afbeelding 1 toont het conceptuele model dat is gebruikt in deze studie van zoetwaterlenzen in droge uiterwaarden. Vanuit de rivier stroomt lichter zoet water over uittredend zout grondwater heen de aquifer in.



Afbeelding 1. Conceptueel model van zoetwaterlens in de uiterwaarden van een rivier. Zout water stroomt met een snelheid  $q_s$  door de landinwaartse grens, waar de grondwaterstand ( $h_a$ ) hoger ligt dan het rivierpeil ( $h_b$ ). De basis van zowel aquifer als rivier ligt zo onder het horizontale landoppervlak

## Verdamping versus zout

In dit onderzoek is gebruikt gemaakt van SUTRASET, een aangepaste versie van het grondwatermodelleringsprogramma SUTRA [3]. In SUTRASET zijn het verdampingsproces en de verandering van de porositeit door zoutaccumulatie toegevoegd aan het originele model. Verdamping is plaats- en tijdafhankelijk, onder invloed van het lokale vochtgehalte van de bodem en drie weerstanden die waterdamptransport naar de atmosfeer reguleren:

- de aerodynamische weerstand van waterdamp die zich verplaatst van bodemoppervlak naar atmosfeer,
- de bodemweerstand, oftewel weerstand tegen het vrijkomen van waterdamp tussen de poriën aan het oppervlak naar de atmosfeer, is afhankelijk van het verzadingsniveau aan het oppervlak,
- de weerstand die ontstaat door het vrijkomen van waterdamp tijdens het neerslaan van zout.

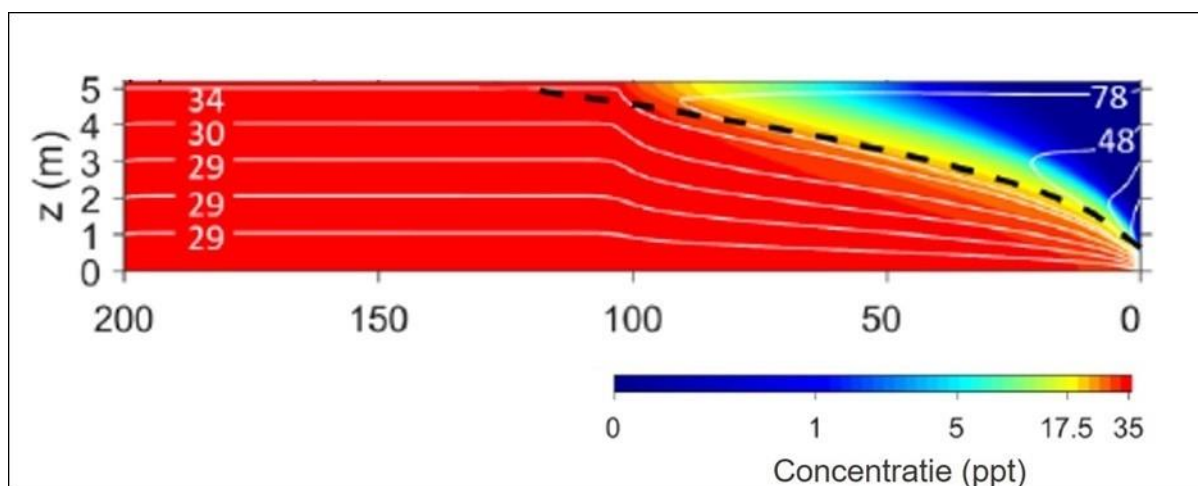
Laatstgenoemde weerstand is afhankelijk van de dikte van de laag aan het bodemoppervlak waarin zoutkristallen zijn geaccumuleerd. Voor meer informatie over deze nieuwe versie van SUTRA verwijzen wij naar eerdere studies [4], [5].

Om de invloed van verdamping op zoetwaterlensen te onderzoeken zijn er drie verschillende benaderingen voor de verdamping (benoemd als a, b, en c) meegenomen:

- a) Water verdampt met medeneming van daarin aanwezig zout, waarbij de invloed van verzilting en zoutkristallisatie dus verwaarloosd wordt.
- b) Water verdampt, waardoor zout zich ophoopt en de dichtheid van water toeneemt. De extra weerstand die ontstaat door geaccumuleerde zoutkristallen aan het bodemoppervlak wordt echter genegeerd.
- c) Hetzelfde als benadering (b), maar de extra weerstand wordt hier wel meegenomen.

Benadering (a) bootst het verwijderen van zout aan het oppervlak na zoals bij overstromingen, zonder dat een daadwerkelijke overstroming gesimuleerd wordt. Benadering (b) leidt tot de grootste verdamping, zoutophoping én dichtheidseffecten bij het bodemoppervlak, terwijl effecten bij

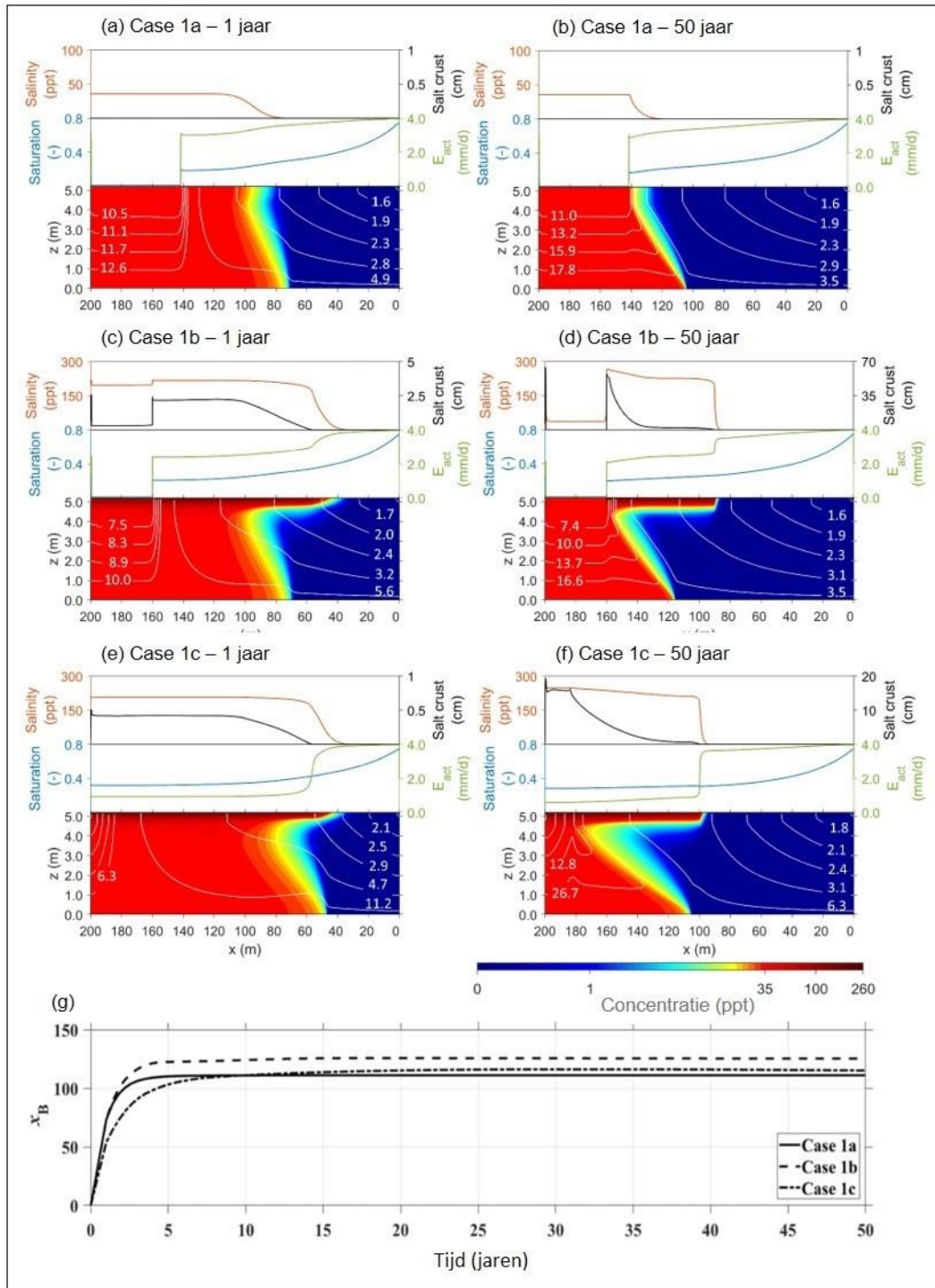
benadering (c) iets gedempt worden door de toenemende weerstand door een zoutlaag. Alle simulaties zijn gedaan voor een periode van 50 jaar en gestart vanuit een stabiele basissituatie zonder verdamping waarbij een langwerpige zoetwaterlens aanwezig was (afbeelding 2).



Afbeelding 2. Concentratieverdeling en stroomlijnen voor basisgeval in stabiele situatie, inclusief onverzadigde zone, maar zonder verdamping. Gestippelde zwarte lijn toont het scherpe grensvlak volgens de analytische oplossing van Werner [6]. Getallen op stroomlijnen geven reistijden (in jaren) aan

## Resultaten

Afbeelding 3 toont de modelresultaten van de drie verschillende verdampingsbenaderingen (a), (b) en (c). Hoewel het niet goed zichtbaar is in afbeelding 3, verlaagt verdamping de grondwaterstand landinwaarts (de linkerhelft van elk paneel van afbeelding 3a-3f); van 5.0 m in de beginsituatie (afbeelding 2), naar respectievelijk 4,3 m, 4,25 m en 4,45 m voor de benaderingen (a) tot (c). Omdat de zoutwaterinstroming aan de linkerkant constant is (en gelijk aan de situatie van afbeelding 2), leidt verdamping tot die grondwaterstandverlaging. Tevens zorgt verdamping voor een toename van de zoetwaterflux vanuit de rivier, welke natuurlijk gelijk is aan de extra verdamping. Hierdoor kan een rivier die gevoed wordt door de omgeving veranderen in een rivier die water verliest naar de omgeving, zoals in de basissituatie. Hierbij verandert de vorm van de zoetwaterlens sterk. Waar het zoet water eerst lensvormig was, in de afwezigheid van verdamping, verdringt het nu het zout over de gehele dikte van de aquifer, met een sterke verzilting bovenin. Deze zoutophoping in benaderingen (b) en (c) leiden tot dunne hypersaline zones (met een hoger zoutgehalte dan zeewater) boven de zoetwaterlens. Deze zones treden niet op wanneer in de modellering zout opgelost in verdampend water ook wordt afgevoerd (benadering (a)). De hypersaline zones die zich bovenin de aquifer vormen zorgen ervoor dat het oppervlak en onderliggende grondwater dat zoet is, kleiner wordt. Dit is cruciaal voor de gezondheid van de vegetatie. Het zoetwatervolume wordt daarentegen aanzienlijk vergroot door verdamping.



Afbeelding 3. Zoutconcentratie aan grondoppervlak (oranje lijnen), dikte van de zoutkorst (zwarte lijnen), waterverzadiging bij maaiveld (blauwe lijnen), verdampingsflux (groene lijnen), concentratieverdelingen (dwarsdoorsneden met  $z$  de verticale positie en  $x$  afstand tot de rivier) en stroomlijnen (ononderbroken witte lijnen) na 1 jaar (linker figuren) en 50 jaar (rechter figuren) voor benadering (a), zout opgelost in verdampend water wordt afgevoerd; subfiguren (a) en (b), benadering (b), zout hoopt zich op door verdamping; subfiguren (c) en (d) en benadering (c), zout hoopt zich op door verdamping, rekening houdend met weerstand tegen verdamping; subfiguren (e) en (f). De beginsituatie, zonder verdamping, wordt getoond in afbeelding 2. Getallen op stroomlijnen geven reistijden (in jaren) aan. Ontwikkeling van een horizontale zoetwaterlens in de bodem van de watervoerende laag ( $x_B$ ), weergegeven in (g) voor benaderingen (a), (b) en (c)

Naast een verandering in vorm van de zoetwaterlens, verandert ook het stromingspatroon. Zo stroomt zoetwater in de lens bij afwezigheid van verdamping tegen de klok in en wordt het water geloosd in het onderste deel van de rivier (afbeelding 2). Wanneer verdamping wel wordt meegenomen, stroomt zoetwater landinwaarts om uiteindelijk via het oppervlak te verdampen (afbeelding 3).

De verdampingsfluxen aan het oppervlak (groene lijnen in afbeelding 3) vertonen complexe patronen. Terwijl verdamping in benaderingen (a) en (c) effectief tot nul wordt verlaagd nabij de linker grens, zorgt de zoutkorst er in benadering (c) voor dat verdamping over het gehele oppervlak mogelijk blijft. Dit is het resultaat van meerdere, onderling afhankelijke processen. Ten eerste wordt verdamping ( $E_{act}$ ) verzwakt door toegenomen osmotische waardes, die de vochtigheid aan het oppervlak onderdrukken bij hoge zoutconcentraties. Ten tweede daalt het bodemvochtgehalte tot extreem lage niveaus (blauwe lijnen, afbeeldingen 3b en 3d) wanneer de verdampingssnelheden niet worden beperkt door korstvorming (benaderingen (a) en (b)).

De daling in onverzadigde doorlaatbaarheid beperkt de waterstroom naar het oppervlak, en dus de hoeveelheid bodemvocht dat beschikbaar is voor verdamping. Hierdoor wordt de hydrologische verbinding tussen het oppervlak en de verzadigde zone verbroken, waarbij verdamping dus niet meer mogelijk is. Dit proces is duidelijk zichtbaar in benadering (b), waarin zout zich in de bovenste bodemzone nabij de linker grens ophoopt voordat de verdamping na een jaar stopt (afbeelding 3c). De zoutwateraanvoer vanaf de linker grens heeft de eerdere zoutopbouw verdund en uitgespoeld, nadat verdamping was gestopt door de droge bodem. Na 50 jaar is het zoutgehalte in de bodem in dit gebied ongeveer gelijk aan de concentratie van het inkomend grondwater vanaf de linker grens (afbeelding 3d). Ten derde wordt de ontwikkeling van een zoutkorst getoond door verschillen in de dikte van de zoutkorst na 1 jaar (afbeeldingen 3c en 3e) en 50 jaar (afbeeldingen 3d en 3f). Zonder het Mulch-effect (het creëren van een weestand tegen verdamping) van de vorming van een zoutkorst (benadering (b)) hoopt het neergeslagen zout zich op tot een buitengewone dikte van 65 cm vergeleken met benadering (c), waar de dikte aan de linkerzijde beperkt is tot ongeveer 20 cm (afbeelding 3).

In benaderingen (b) en (c) vormen zich nabij het oppervlak ongeveer na 1 jaar hypersaline zoutpluimen. De door verdamping aangedreven opwaartse stroming van grondwater die naar deze pluimen leidt, is groot genoeg om de ontwikkeling van 'salt fingers' tegen te gaan, die anders zouden ontstaan als gevolg van neerwaarts zouttransport. Het verschijnsel, waarbij zoutwater boven zoetwater stagneert, is een vorm van door verdamping veroorzaakte stagnatie van zoutpluimen, ook wel stasis genoemd. Het zorgt dat vegetatie in de onverzadigde hypersaline zone, mogelijk niet profiteert van het zoete water in de diepere watervoerende laag, tenzij de wortels het diepere zoetwaterreservoir kunnen bereiken. Periodieke overstromingen, die in de huidige analyse worden verwaarloosd, zouden deze overtollige zouten echter gedeeltelijk kunnen verwijderen uit de uiterwaarden en ondiepe watervoerende lagen [7], [8], [9].

Na 50 jaar heeft alleen benadering (a) een stabiele toestand bereikt. In benaderingen (b) en (c) kan zout het systeem niet verlaten, waardoor een stabiele toestand niet kan worden bereikt. Zoals te zien is in afbeelding 3g, is de zoutwaterverdeling na 10 jaar bijna stabiel. Dan verplaatst de overgang van zoet naar zout grondwater onderin het grondwaterpakket  $x_B$  zich nauwelijks meer. In benaderingen (b) en (c) is de hoeveelheid zout die zich nabij het oppervlak ophoopt nagenoeg in evenwicht met de hoeveelheid zout die na 50 jaar de linker grens is binnen gedrongen. Ook dit is in overeenstemming met een gestabiliseerde verdeling van zoet en zout grondwater. Er zijn aanwijzingen dat de lenzen

door voortdurende zoutophoping langzaam zullen samentrekken (ongeveer 2 meter in 30 jaar, in benadering (c)). Hier zijn echter simulaties van langere duur nodig om de uiteindelijke stabiele toestand vast te stellen. Dit vereist meer rekenkracht dan momenteel beschikbaar is, gezien de lange looptijden voor de benaderingen die in dit artikel worden gepresenteerd.

Om de invloed van verdamping op zoetwaterlenzen verder te onderzoeken zijn verschillende parameters, zoals dikte van de onverzadigde zone, bodemtype (middels de verzadigde doorlatendheid, hydraulische parameters ( $\alpha$  en  $n$ ), het residuele verzadigingsniveau ( $S_{wres}$ )) en de potentiële verdamping (i.e., aerodynamische weerstand ( $r_a$ )), gevarieerd in grootte om een breed scala aan situaties te schetsen. Voor meer informatie wordt verwezen naar een publicatie in *Water Resources Research* [10].

### Conclusie

In dit onderzoek is bekeken wat de invloed van verdamping kan zijn op de zoet/zoutbalans van het grondwaterpakket. Die invloed kan groot zijn, omdat een relatief kleine verdampingsflux aan het bodemoppervlak toch een grote hoeveelheid water kan afvoeren als het bodemoppervlak groot genoeg is. Zo is gebleken dat verdamping ervoor kan zorgen dat water uit de rivier verder de watervoerende laag in getrokken wordt, waarbij rivieren die normaal water onttrekken uit de omgeving kunnen veranderen in rivieren die water afgeven aan de omgeving. Dit beïnvloedt de vorm van de zoetwaterlens sterk. Waar het zoet water eerst lensvormig is, in de afwezigheid van verdamping, verdringt het nu het zout over de gehele dikte van de aquifer. Daarnaast leidt verdamping tot de ophoping van zout nabij de grondwaterstand en tot extreem verzilte condities in de bodem. Het zoete water dat door verdampingsfluxen omhoog wordt getrokken, was in sommige gevallen groot genoeg om de naar beneden gerichte zoutfluxen tegen te gaan, waardoor stasis ontstaat in de verzilte bovenlaag. In sommige gevallen kan dit leiden tot een afname in de omvang van de zoetwaterlens aan het oppervlak, ondanks een toename van het volume. Vegetatie die groeit op de extreem verzilte locaties, kan dan geen gebruik meer maken van het zoete water dat dieper in de watervoerende laag zit, tenzij de wortels het dieper gelegen zoetwaterreservoir kunnen bereiken. Daarnaast toont deze modelstudie aan dat lange tijdframes (tientallen jaren) nodig zijn om door menselijk toedoen verzilte bodems uit te spoelen.

Verdamping is alleen mogelijk wanneer de hydrologische verbinding tussen landoppervlak en verzadigde zone kan worden behouden. Het is hierbij belangrijk dat de grondwaterstand niet te ver zakt door verdamping. Dit laatste kan gebeuren wanneer een verziltingslaag geen tot weinig weerstand biedt aan de waterstroming.

Dit onderzoek toont aan dat verdamping een grote invloed kan hebben op de zoutverdeling, stromingspatronen en waterbalans in uiterwaarden van (extreem) droge gebieden en in vergelijkbare laaglanden in het algemeen. Gebleken is dat verdamping wel of niet verdisconteren in de simulaties van grote invloed is op de vorm van de zoetwaterlens en de verdeling van zout, bijvoorbeeld als extreem verzilte lagen. Veel van het gepubliceerde onderzoek naar zoetwaterlenzen in het achterland en zoetwaterbellen in de duinen beperkt zich tot het verzadigde grondwaterpakket. Dit onderzoek laat zien dat onverzadigde zoneprocessen en de vegetatie en atmosfeer ook een belangrijke invloed kunnen hebben op de verschijnselen in het verzadigde grondwater.

Ook in Nederland is het risico op verzilting de laatste jaren toegenomen door zeespiegelstijging en aanhoudende droogte [11], [12], [13]. De daadwerkelijke effecten van toenemende neerslagtekorten

zijn nog onduidelijk. Ook in andere delen van de wereld komt verziltingsproblematiek vaker voor. Het is daarom van belang dat de invloed van verdamping en de daarbij horende onverzadigdezoneprocessen (zoals zoutophoping) goed meegenomen worden in vervolgstudies.

### Dankwoord

Dit onderzoek is deels uitgevoerd in het kader van het project Water Nexus, dat wordt ondersteund door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) en de ministeries van Economische Zaken en Klimaat en van Infrastructuur en Waterstaat en de partners van het Nederlandse Water Nexus-consortium, NWO-contract 14299.

### Referenties

1. Louw, P. G. B. de et al (2011). 'Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage'. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3659-3678. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-7657-2011>
2. Werner, A. D., & Laattoe, T., 2016. Terrestrial freshwater lenses in stable riverine settings: Occurrence and controlling factors. *Water Resources Research*, 52 (5), 3654–3662. <https://doi.org/10.1002/2015WR018346>
3. Voss, C. I., & Provost, A. M. (2008). 'Sutra'. *US Geological Survey Water Resources Investigation Reports*, 84–4369, Reston, Virginia. [https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/sutra/SUTRA\\_2\\_2-documentation.pdf](https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/sutra/SUTRA_2_2-documentation.pdf), geraadpleegd op 15 juli 2018.
4. Zhang, C., Li, L., & Lockington, D., 2014. Numerical study of evaporation-induced salt accumulation and precipitation in bare saline soils: Mechanism and feedback. *Water Resources Research*, 50 (10), 8084–8106. <https://doi.org/10.1002/2013WR015127>
5. Shen, C., Zhang, C., Xin, P., Kong, J., & Li, L., 2018. Salt dynamics in coastal marshes: Formation of hypersaline zones. *Water Resources Research*, 54, 3259–3276. <https://doi.org/10.1029/2017WR022021>
6. Werner, A. D., 2017. Correction factor to account for dispersion in sharp-interface models of terrestrial freshwater lenses and active seawater intrusion. *Advances in Water Resources*, 102, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.02.001>
7. Holland, K. L., Turnadge, C. J., Nicol, J. M., Gehrig, S. L., & Strawbridge, A. D. (2013). *Floodplain response and recovery: comparison between natural and artificial floods*, Goyder Institute for Water Research Technical Report Series No. 13/4, Adelaide, South Australia. <http://www.goyderinstitute.org/index.php?id=20>
8. Jolly, I. D., McEwan, K. L., & Holland, K. L. (2008). 'A review of groundwater–surface water interactions in arid/semiarid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology'. *Ecohydrology*, 1 (1), 43–58. <https://doi.org/10.1002/eco.6>
9. Overton, I., Jolly, I., Slavich, P., Lewis, M., & Walker, G. (2006). 'Modelling vegetation health from the interaction of saline groundwater and flooding on the Chowilla floodplain, South Australia'. *Australian Journal of Botany*, 54 (2), 207–220. <https://doi.org/10.1071/BT05020>
10. America, I., Zhang, C., Werner, A. D., & Zee, S. E. A. T. M. van der (2020). 'Evaporation and salt accumulation effects on riparian freshwater lenses'. *Water Resources Research*, <https://doi.org/10.1029/2019WR026380>

11. Oude Essink, G. H. P., Baaren, E. S. van & Louw, P. G. de (2010). 'Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands'. *Water resources research*, 46(10). <https://doi.org/10.1029/2009WR008719>
12. KNMI (2014). *KNMI Klimaatscenario's*. <http://www.klimaatscenarios.nl>
13. Joris Tieleman (2020, 25 september). 'Bij droogte stijgt zout water op naar de akkers, een nachtmerrie voor boeren'. *Volkscrant*. Geraadpleegd van <https://www.volkscrant.nl/nieuws-achtergrond/bij-droogte-stijgt-zout-water-op-naar-de-akkers-een-nachtmerrie-voor-boeren~b15b014d/>