

## Memo

<b>Datum</b> 10 November 2010	<b>Aantal pagina's</b> 9	
<b>Van</b> Gualbert Oude Essink Jarno Verkaik	<b>Doorkiesnummer</b> 06-30550408 088335-7163	<b>E-mail</b> <a href="mailto:gualbert.oudeessink@deltares.nl">gualbert.oudeessink@deltares.nl</a> <a href="mailto:jarno.verkaik@deltares.nl">jarno.verkaik@deltares.nl</a>

### Onderwerp

Verzilting en verzoeting van het grondwater systeem in Nederland onder invloed van klimaatscenario's, gebruikmakend van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium module Zoet-Zout

## NHI zoet-zout: grondwater in het Nederlandse kustgebied

### 1 Inleiding

Eind 2009 is in opdracht van Rijkswaterstaat begonnen met de ontwikkeling van de zoet-zout module in het NHI grondwater modelinstrumentarium ter ondersteuning van onderzoek betreffende de toekomstige Zoetwatervoorziening van Nederland (Oude Essink *et al.*, 2010a). Een belangrijk doel van het instrument is de veranderingen in de zoet-brak-zout verdeling in de ondergrond en de zoutvrachten vanuit de ondergrond naar het oppervlaktewater te kunnen voorspellen onder invloed van verschillende ontwikkelingsscenario's. Hierbij wordt gedacht aan scenario's voor klimaatverandering (KNMI'06 scenario's), zeespiegelstijging en bodemdaling, maar ook aan scenario's van menselijke activiteiten zoals verandering grondwateronttrekkingsregimes of waterbeheersmaatregelen (een ander IJsselmeerpeil).

Het zoet-zout instrumentarium kan ingezet worden:

1. om langjarige veranderingen in de interne verzilting door langzame stroming van brak tot zout grondwater naar het oppervlak te kwantificeren.
2. om het effect van allerlei scenario's op variabelen als chloride concentraties, zoute kwel, zoutvrachten naar oppervlaktewater en volumes zoet grondwater te kwantificeren.
3. om risico- en kansengebieden met betrekking tot zoet water in laag Nederland te identificeren, zoals kaarten met de kwetsbaarheid van ondiepe regenwaterlenzen in het kustgebied.
4. om de haalbaarheid van grootschalige oplossingsstrategieën te analyseren.

Zie [www.nhi.nu](http://www.nhi.nu) en wiki-site <http://zoetzout.deltares.nl><sup>1</sup> voor additionele informatie.

### 2 Technische specificaties

Eigenschappen van NHI zoet-zout zijn:

- 3D, niet-stationair voor zouttransport
- dichtheidsgedreven grondwaterstroming
- gekoppeld stoftransport (zowel advectief als dispersief transport)
- geheel laag Nederland ~25000 km<sup>2</sup>
- modelcellen grootte 250\*250m<sup>2</sup>
- 1200\*1300 cellen en 31 modellagen
- verschillende tijdschalen mogelijk: jaarlijks/ seizoenaal/maandelijks/decades

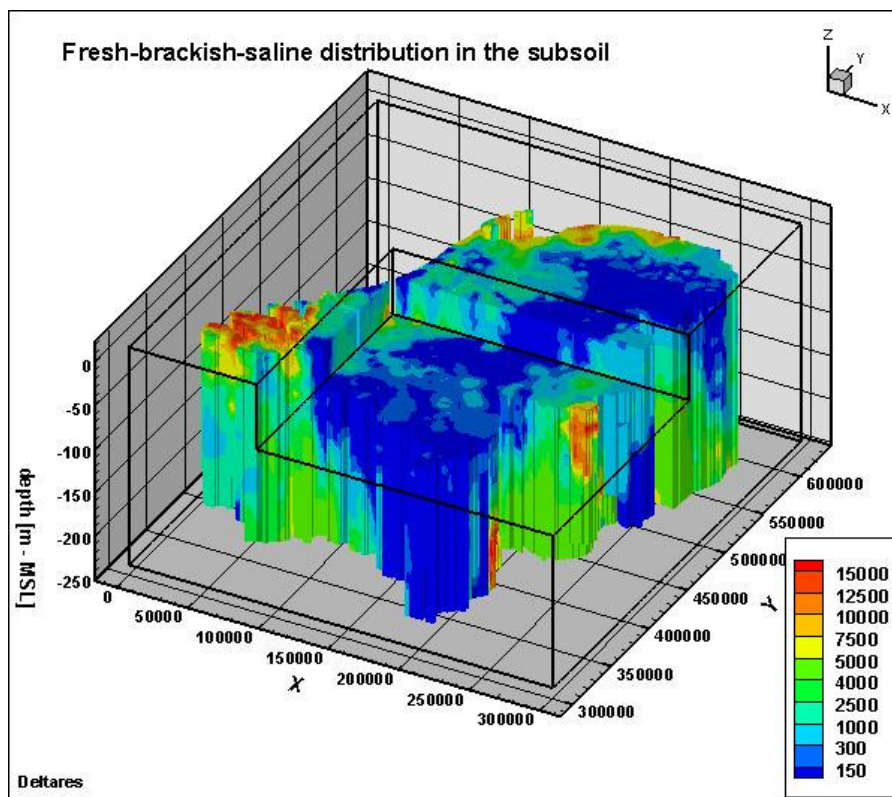
<sup>1</sup> Tot eind 2010: <http://public.deltares.nl/display/ZOETZOUT/Landelijke+studies>

Datum  
9 November 2010

Pagina  
2/9

- NHI geologie, versie 2.0
- simulaties 100 jaar

Het 3D initiële zoet-brak-zout veld (figuur 1) is bepaald aan de hand van verschillende databanken, zijnde chloride concentratie analyses, VES metingen en boorgatmetingen (Oude Essink *et al.*, 2005). Er is gebruik gemaakt van ZZRegis (Kloosterman, 2007) en via een geostatistische methode is een 3D veld gegenereerd (Pebesma, 2009, Goes *et al.*, 2009). Vervolgens is het numerieke model gebruikt om na een simulatie van 30 jaar te komen tot een meer gestroomlijnde dichtheidsverdeling, waar de grootste numerieke inversies uit zijn gefilterd. De aldus gecreëerde zoet-zout verdeling dient als basis voor de verdere berekeningen.



Figuur 1. 3D chloride verdeling in de Nederlandse ondergrond.

De op te leveren variabelen (als een functie van de tijd) zijn:

- chloride concentraties in de ondergrond
- kwel en infiltratie fluxen
- zoetwaterstijghoogten (Santing, 1980; Oude Essink, 2001a; Post *et al.*, 2007)
- zoutvrachten naar het oppervlaktewater systeem
- volumes zoet grondwater

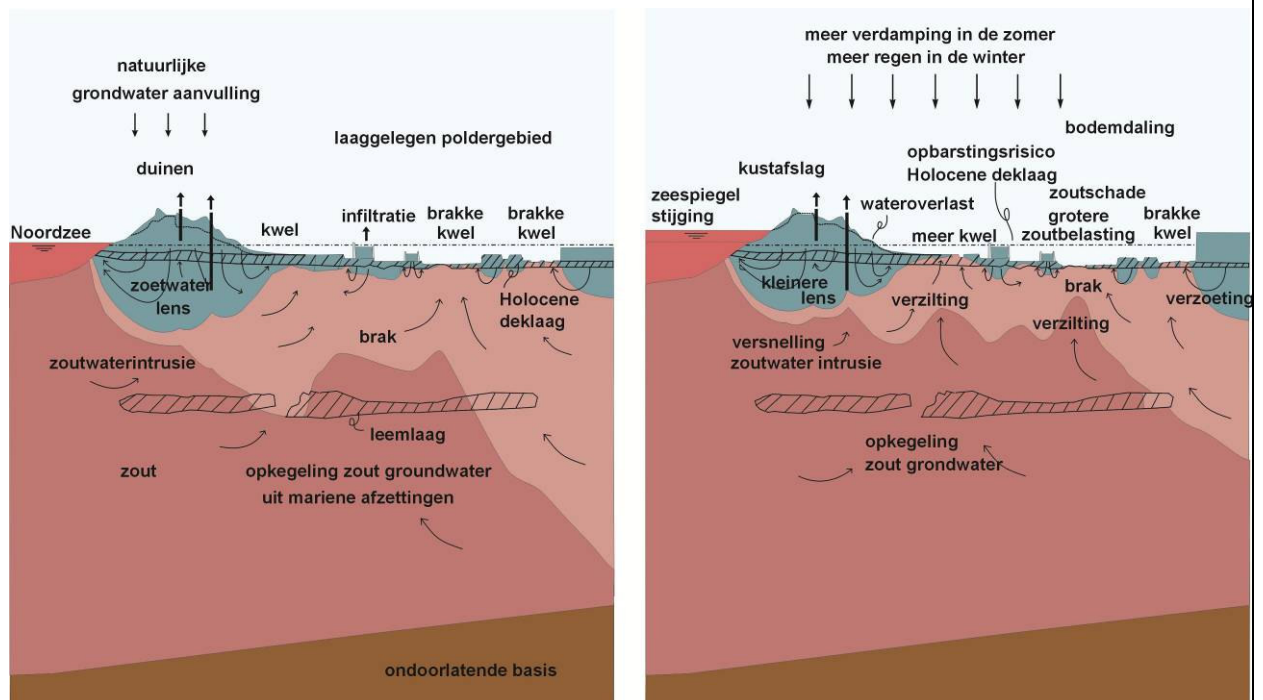
Voor de modellering van zoet-brak-zout grondwater op landelijke schaal is gebruik gemaakt van ervaringen die zijn opgedaan in eerdere zoet-zout modelstudies, zowel op nationale schaal (Kwadijk *et al.*, 2007; Oude Essink, 2007; Stuurman *et al.*, 2008; Oude Essink en Van Baaren, 2009), regionale schaal (Noord-Holland (Oude Essink, 2001b); Zuid-Holland (Oude Essink *et al.*, 2008; 2010b) en Zeeland (Van Baaren *et al.*, 2010)) als lokale schaal (Oude Essink *et al.*, 2008; 2009; Voortman *et al.*, 2010).

## 3 Verzilting van grondwater systeem is een traag proces

Het ondiepe grondwater in laag Nederland is op veel plaatsen brak tot zout. Dit is Noordzee water van enkele honderden tot duizenden jaren geleden dat in de ondergrond is achtergebleven toen de zee zich uit dit deel van ons land terugtrok (Vos en Kiden, 2005). Het brakke tot zoute grondwater kan problemen veroorzaken door 'uit te treden' als zoute kwel en 'interne' verzilting van het oppervlaktewater te veroorzaken (figuur 2). Hierdoor kan dit water niet meer gebruikt worden als beregeningswater of voor veedrenking. Het oppervlaktewater wordt daarom doorgespoeld, waardoor grote hoeveelheden zoet water 'verloren' gaan. Het brakke tot zoute grondwater kan uiteindelijk ook de wortelzone bereiken, waardoor zoutschade aan bepaalde soorten gewassen en natuur zou kunnen optreden.

Verziltiging van het oppervlaktewater kent in de tijd zowel een kortdurende (seizoenale) dynamiek door de wisselende verhouding tussen zoute kwel en zoet regenwater, als een autonoom proces over langere tijdschalen. Dit laatste wordt veroorzaakt door drukverschillen tussen lage grondwaterstanden en hoge stijghoogten in het watervoerend pakket. Dit proces is al eeuwen aan de gang: door ontwatering van de bodem (leidend tot bodemdaling (van de Ven, 1993) en de vele inpolderingen sinds de 13de eeuw stroomt het zoute grondwater langzaam naar de oppervlakte. De komende eeuwen zal dit proces zich doorzetten, versterkt door bodemdaling, zeespiegelstijging en klimaatverandering (Oude Essink, 1996).

Bij analyses van de toekomstige zoetwatervoorziening in Nederland dient deze toenemende interne verzilting daarom meegenomen te worden. Het NHI zoet-zout model is ontwikkeld om de langzame toestroming van het brakke tot zoute grondwater naar het oppervlak te kwantificeren. Het instrument zal daarmee de noodzakelijke interne verziltingsrandvoorwaarden op nationale schaal leveren voor scenariostudies in het kader van de zoetwatervoorziening.



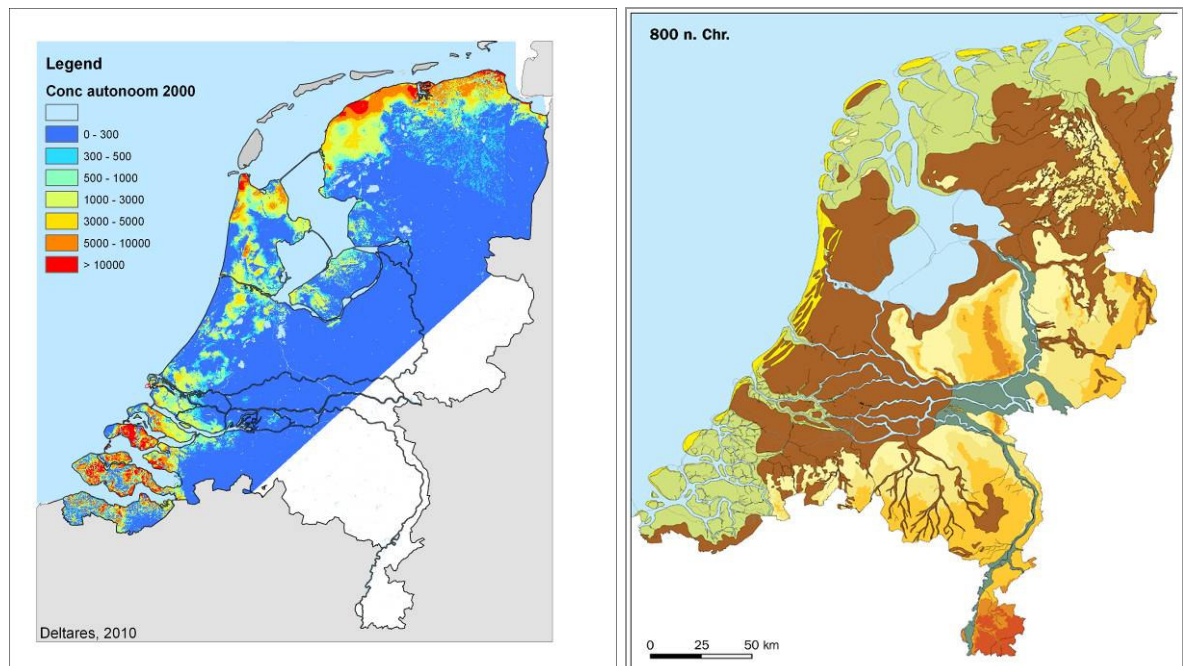
Figuur 2. Vereenvoudiging van het regionale grondwatersysteem in het kustgebied: a. huidige situatie, inclusief grondwateronttrekkingen en b. toekomstige situatie, met de processen die mogelijk kunnen optreden. Zoutwater intrusie vindt op regionale schaal plaats omdat het gemiddeld polderpeil enkele meters lager ligt dan het gemiddeld zeeniveau, terwijl op lokale schaal verzoeting kan optreden op de overgang van hooggelegen gebieden waar infiltratie plaatsvindt en laaggelegen droogmakerijen.

## 4 Resultaten klimaatscenario's

In deze memo worden een tweetal scenario's gedraaid:

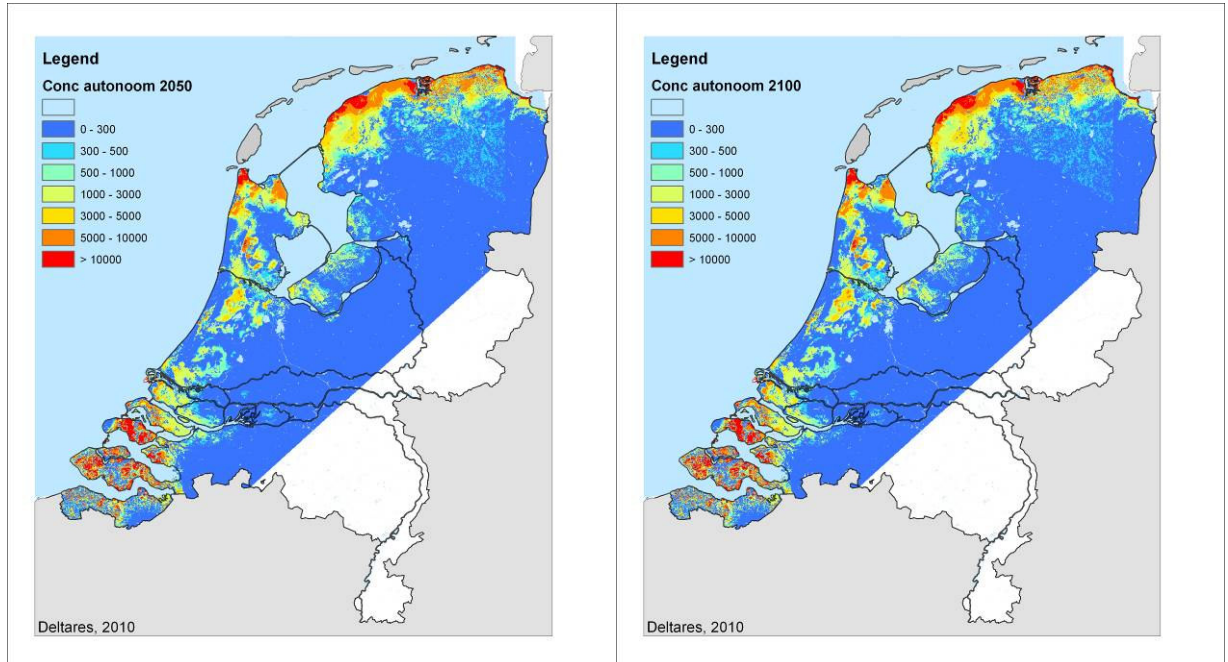
- Autonom scenario:
  - geen zeespiegelstijging
  - geen veranderend neerslag en verdampingspatronen
  - geen bodemdaling
- W+ scenario:
  - zeespiegelstijging
  - een veranderend neerslag en verdampingspatronen
  - bodemdaling

Figuur 3 laat de huidige zoet-zout verdeling in de ondergrond ter hoogte van de onderkant van de Holocene deklaag. Duidelijk is te zien dat er drie dominante zoute gebieden zijn: a. Zeeland, Kop van Noord-Holland en Noord-Nederland. Ons inziens is er een sterke correlatie tussen de mariene transgressies tijdens het Holoceen verleden (het zeewater kon toen infiltreren in de onderliggende zandpakketten) en de huidige zoet-zout verdeling in de ondergrond in het kustgebied (Post, 2004; Stuurman *et al.*, 2008; Voss en Kiden, 2005).

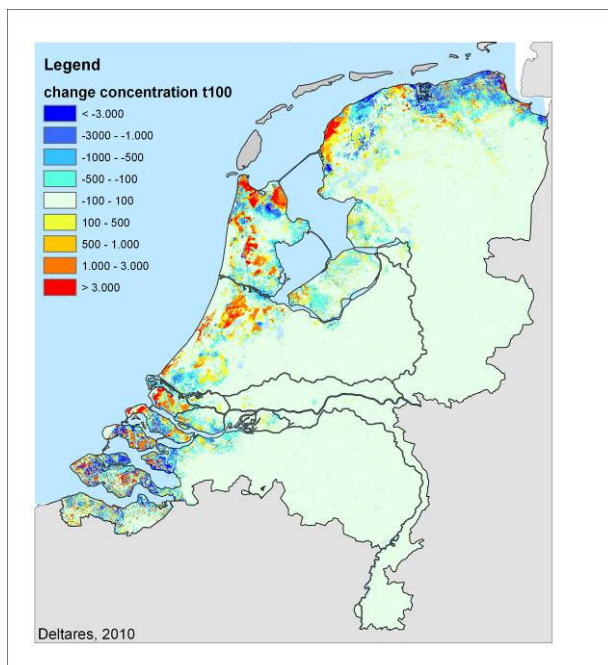


Figuur 3 a. Huidige (2000AD) chloride concentratie verdeling onderkant deklaag, gebaseerd op metingen; b. De Holocene transgressie van 800 AD: bruin=veen, geel=(duin)zand, groen=getijde gebied waar zout oppervlaktewater aanwezig is.

De figuren 4 en met name 5 tonen de toename van de verzilting onder het autonome scenario, hetgeen inhoudt dat er geen randvoorwaarden zoals neerslagpatronen en zeespiegel niveau veranderen. De zoutvrucht naar het oppervlaktewater zou hierdoor – afhankelijk van de beschouwde locatie – kunnen verdubbelen in 2100 (zie ook Oude Essink *et al.*, 2010b).

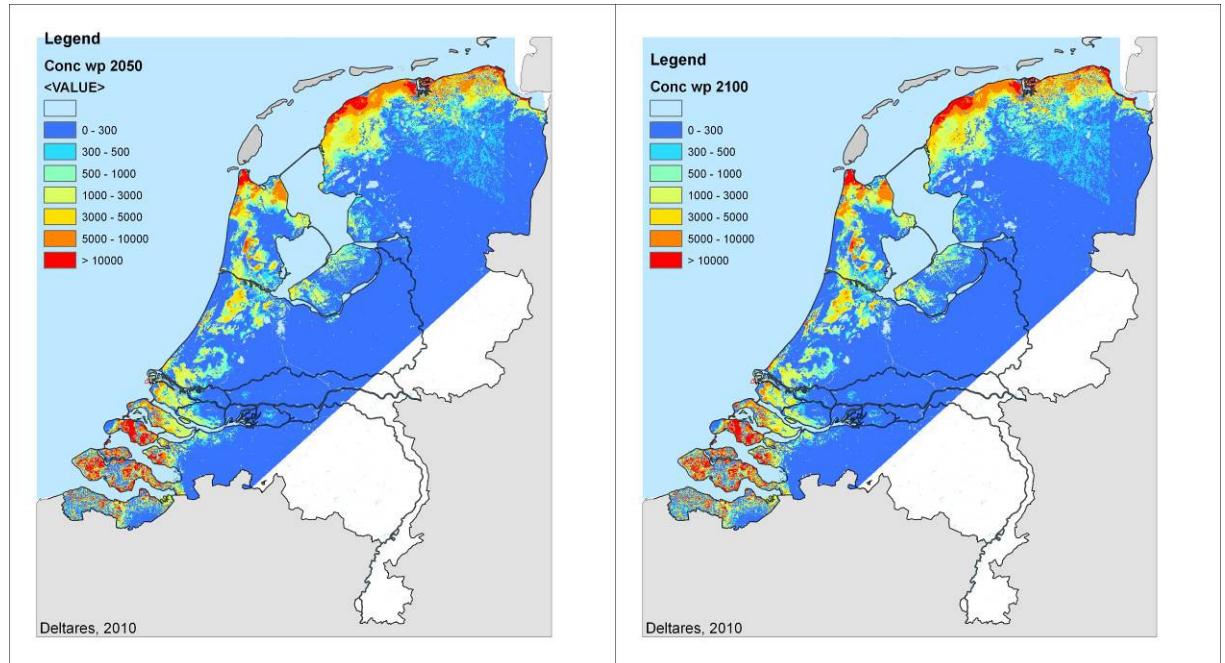


Figuur 4 Chloride concentratie verdeling onderkant deklaag op 2050AD en 2100AD onder het autonome scenario.

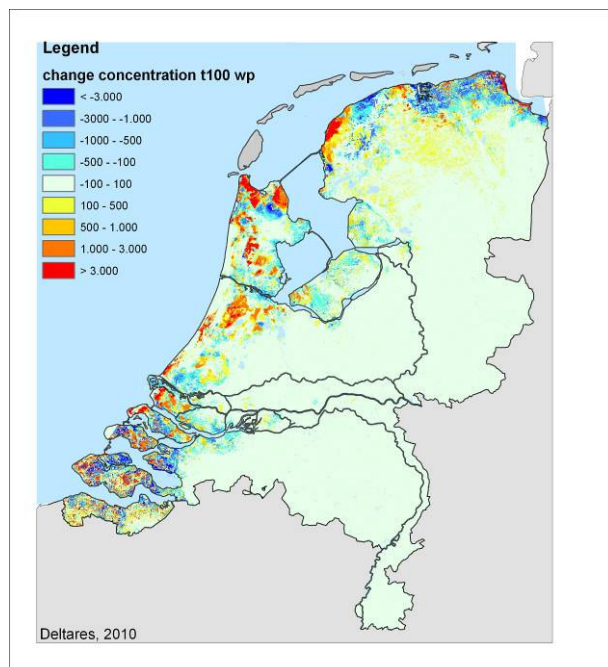


Figuur 5 Verandering in chloride concentratie verdeling onderkant deklaag op 2050AD en 2100AD onder het autonome scenario.

De figuren 6 en met name 7 tonen de toename van de verzilting onder het W+ scenario.

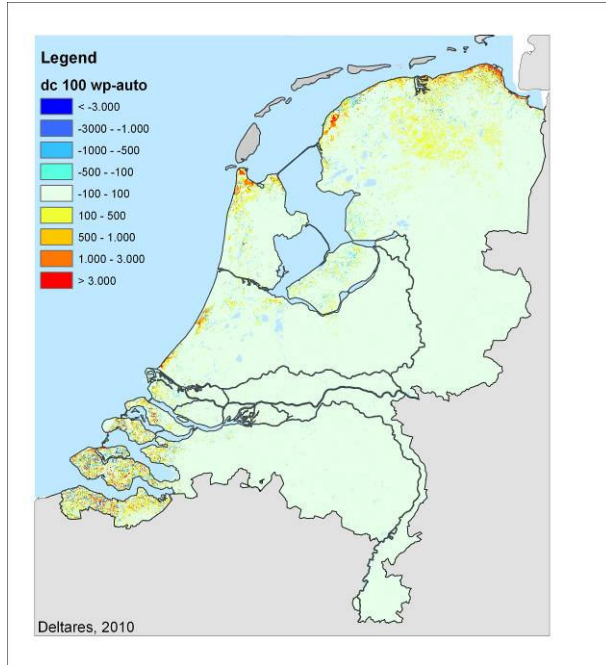


Figuur 6 Chloride concentratie verdeling onderkant deklaag op 2050AD en 2100AD onder het W+ scenario.



Figuur 7 Verandering in chloride concentratie verdeling onderkant deklaag op 2050AD en 2100AD onder het W+ scenario.

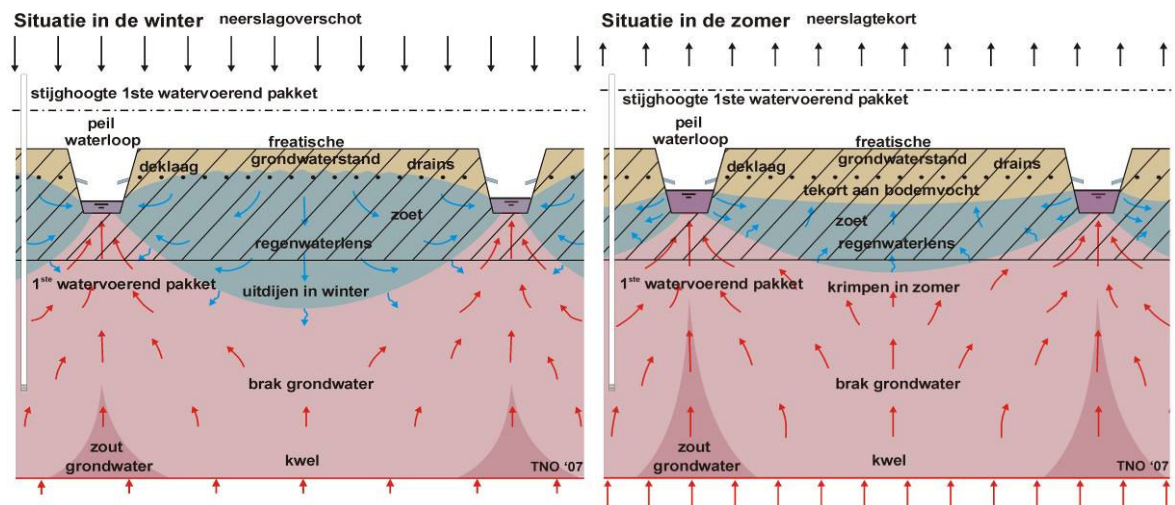
Tenslotte toont figuur 8 de **extra** toename van de verzilting onder het W+ scenario ten opzichte van het autonome scenario, over 100 jaar. De verschillen tussen de scenario's lijken significant kleiner te zijn dan de verschillen als een functie van de tijd: met andere woorden: het autonome verziltingsproces is dominant ten opzichte van het verziltingsproces door klimaatverandering en zeespiegelstijging.



Figuur 8 Verskil in chloride concentratie verdeling onderkant deklaag tussen W+ en autonoom over 100 jaar: met name in het kustgebied ondervindt een extra verzilting.

## 5 Disclaimer

De kaarten geven een ruw beeld van de verzilting en verzoeting in Nederland tot nationale schaal. Voor de subregionale en lokale schaal zijn deze resultaten te grof, omdat daar lokale processen het systeem complexer maken (zie bijv. figuur 9, Oude Essink *et al.*, 2009). Binnen allerlei onderzoeksprogramma's wordt dit verder onderzocht (o.a. het Kennis voor Klimaat programma (2<sup>de</sup> Tranche, Thema 2 *Climate Proof Fresh Water Supply* <http://www.klimaatonderzoeknederland.nl/>, NMDC, NDP ZWD, etc.).



Figuur 9 Schematische weergave van een dynamische regenwaterlens. Gedurende het gehele jaar stroomt brak grondwater naar de sloten omdat het slootpeil laag ligt ten opzichte van de stijghoogte in het watervoerend pakket.

## 6 Resultaten klimaatscenario's

- Goes, B.J.M., Oude Essink, G.H.P., Vernes, R.W. and Sergi, F. 2009. Estimating the depth of fresh and brackish groundwater in a predominantly saline region using geophysical and hydrological methods, Zeeland, the Netherlands, Near Surface Geophysics 401-412.
- Kloosterman, F.H. 2007. Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite. TNO.
- Kwadijk, J., Vuren, van, S. Verhoeven, G., Oude Essink, G., Snepvangers, J. en Calle, E. 2007, Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding, i.o.v. Milieu en Natuurplan Bureau, Deltares-rapport, Q4394, 73 p.
- Louw, P. de & Oude Essink, G.H.P. 2005 Verzilting grondwatersysteem Wetterskip Fryslan, i.s.m. Arcadis, TNO-rapport 2006-U-R0152/A, 29p.
- Maljaars, P.S., Wils, R.A., de Louw, P., Oude Essink, G. en Wirdum, G. 2006. Regenwaterlenzen in zoute kwelsystemen, TNO, 2006-U-R0086/A, 121 p.
- Oude Essink, G.H.P. 2001a. Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands.
- Oude Essink, G.H.P. 2001b. Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in The Netherlands: a Numerical Study, Transport in Porous Media 43(1): 137-158.
- Oude Essink, G.H.P., Houtman, H. & B.J.M. Goes, 2005, Chloride-concentratie onderkant deklaag in Nederland, NITG 05-056-A, 17 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Oude Essink, G.H.P. 2007. Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, H2O, nr 19, 60-64.
- Oude Essink, G.H.P., Baaren, E., van en Vliet, M. van, 2008, Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, Deltares-rapport 2008-U-R0322/A, 60 p.
- Oude Essink, G.H.P. en Baaren, E., van, 2009, Verzilting van het Nederlandse Grondwatersysteem, Deltares 2009-U-R91001, 24 p.
- Oude Essink, G.H.P., Louw, de, P., Stevens, S., de Veen, B., de, Prevo, C., Marconi, V. en Goes, B. 2009, Meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland, 2007-U-R0925/A, 132p.
- Oude Essink, G., Verkaik, J., Delsman, J., De Lange, W., 2010a, Stand van zaken NHI zoetzout grondwater model, Deltares memo 1202273-000-BGS-0004-cl, 5p.
- Oude Essink, G.H.P., E.S. van Baaren, en de Louw, P.G.B. 2010b, Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, Water Resour. Res., 46, W00F04, doi:10.1029/2009WR008719.
- Pebesma, E. 2009. Threedimensional interpolation of subsurface chloride concentrations in the Netherlands, University Munster, Germany, 12p.
- Post, 2004. Groudwater salinization processes in the coastel area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. Proefschrift. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Post, V.E.A., H. Kooi, C.T. Simmons. 2007. Using Hydraulic Head Measurements in Variable-Density Ground Water Flow Analyses. Ground Water: DOI 10.1111/j.1745-6584.2007.00339.x
- Santing, G. 1980. Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten. H2O 13(22): 544-548.
- Stuurman, R., Baggelaar, P., Berendrecht, W., Buma, J., Louw, P., de, Oude Essink, G.H.P., 2008, Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO rapport, i.o.v VROM, 2008-U-R0074/B, 85 p.



**Datum**  
9 November 2010

**Pagina**  
9/9

- Van Baaren, E.S., van, Oude Essink, G.H.P., Janssen, G., De Louw, P.G.B. 2010. Verzoeting Verzilting Grondwater in de Provincie Zeeland, Beschrijving van het 3D dichtheidsafhankelijk grondwater en model (concept).
- Voortman, B.R., de Louw, P., Oude Essink, G.H.P. 2010. De invloed van gebiedseigenschappen en klimaatverandering op de dikte en vorm van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland. Deltares
- Vos, P., and P. Kiden (2005), The landscape evolution during the Stone Age, in: The Stone Age of The Netherlands, Deeben, J., E. Drenth, M.-F. van Oorsouw, and L. Verhart (Eds), 7-37, ISBN 90-807149-2-5.

Een groot aantal van bovenstaande artikelen en rapporten is terug te vinden onder de wiki-site: <http://zoetzout.deltares.nl/> en in het bijzonder <https://public.deltares.nl/display/ZOETZOUT/Publicaties>

## 7 Presentaties en poster

- Verkaik, J. and Oude Essink, G.H.P., 2010. The Netherlands Hydrological modelling Instrument for fresh-saline groundwater. Abstracts Deltas in Times of Climate Change, 29 sept-1 oct. 2010, Rotterdam, The Netherlands.
- Verkaik, J., Hunink, J. Baaren, E.S., van, Delsman J. and Oude Essink, G.H.P., 2010. NetherlandsHydrological modelling Instrument for fresh and saline groundwater in the Dutch coastal zone. Proceedings 21nd SWIM, 21-25 June 2010, Azores, Portugal.
- Poster: [http://public.deltares.nl/download/attachments/37880380/SWIM\\_NHI\\_v2.pdf?version=1&modificationDate=1282040506000](http://public.deltares.nl/download/attachments/37880380/SWIM_NHI_v2.pdf?version=1&modificationDate=1282040506000)

### **Nadere informatie:**

Gualbert Oude Essink/Jarno Verkaik  
Deltares, Subsurface and Groundwater Systems  
PO Box 85467  
3508 AL Utrecht  
The Netherlands  
+31(0)630550408/+31(0)88335 7163  
[gualbert.oudeessink@deltares.nl](mailto:gualbert.oudeessink@deltares.nl) / [jarno.verkaik@deltars.nl](mailto:jarno.verkaik@deltars.nl)