



# Klimaatverandering en verzilting in Zuid-Holland in beeld gebracht

MARIJN KUIJPER, TNO-NITG  
 GUALBERT OUDE ESSINK, TNO-NITG  
 ROEL VAN BINSBERGEN, PROVINCIE ZUID-HOLLAND  
 BENNIE MINNEMA, TNO-NITG

*Het grondwater in Zuid-Holland verzilt in toenemende mate. Vooral de diepe polders, die sinds de middeleeuwen zijn drooggelegd, hebben hierop een grote invloed. Het grondwatersysteem is nog niet ‘bekomen’ van deze ingrepen en als gevolg daarvan neemt de zoetwatervoorraad in Zuid-Holland nog steeds af. In de Europese Kaderrichtlijn Water wordt voorgeschreven dat veranderingen binnen grondwaterlichamen door autonome ontwikkelingen of door menselijk ingrijpen kwantificeerbaar gemaakt moeten worden. Hierbij spelen bodemdaling en zeespiegelrijzing ten gevolge van klimaatveranderingen een belangrijke rol. Met welke snelheid verzilt het grondwater en wat blijft uiteindelijk van het zo kostbare zoete grondwater over? Deze vragen vormden de basis voor een gezamenlijk onderzoek<sup>1)</sup> van de provincie Zuid-Holland en TNO-NITG.*

Voor het beheer van grondwater, bodem en natuur door de provincie Zuid-Holland is het belangrijk te weten met welke snelheid het grondwater verzilt en waar uiteindelijk nog zoet grondwater overblijft. Hoe gaan we Nederland in de nabije toekomst ruimtelijk inrichten? Welke vormen van landgebruik zijn nog mogelijk? Hoe groot is onze invloed op de verzilting en hoe kunnen we hierop inspelen? Om deze aspecten in het volgende grondwaterbeheersplan verder uit te kunnen werken, is meer kennis nodig over de snelheid en regio-

nale verdeling van de verzilting van het grondwatersysteem.

## Doelstelling

De provincie Zuid-Holland heeft het onderzoek opgezet samen met TNO-NITG. Het doel was een regionaal beeld te construeren van de verdeling van het zoete, brakke en zoute grondwater en de verandering daarvan binnen Zuid-Holland. Het onderzoek richtte zich op de verzilting van het grondwater binnen de watervoerende pakketten tot het jaar

2200. De twee volgende vragen moesten beantwoord worden:

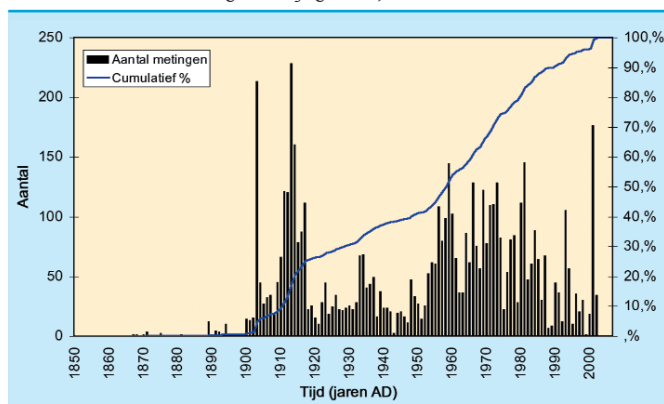
- Hoeveel zoet\* grondwater is er momenteel aanwezig in Zuid-Holland?
- Wat gebeurt er als we niets veranderen in het waterbeleid? Neemt de omvang van de voorraad zoet grondwater af of toe in de komende 200 jaar? Waar in Zuid-Holland vindt dit proces vooral plaats? Een studie naar de toekomstige verzilting is niet eenvoudig, omdat de tijdshorizon ver weg ligt. Daarnaast is voor de bepaling van de zoet-zoutverdeling slechts een beperkte hoeveelheid meetreeksen beschikbaar, waarin naast grondwaterstanden ook chloridegehalten gemeten zijn; bij de grondwatermonitoring van de afgelopen decennia heeft de nadruk meestal niet gelegen op de kwaliteit- en verziltingproblematiek (zie afbeelding 1).

## Modelopbouw en ijking Dichtheidsverschillen

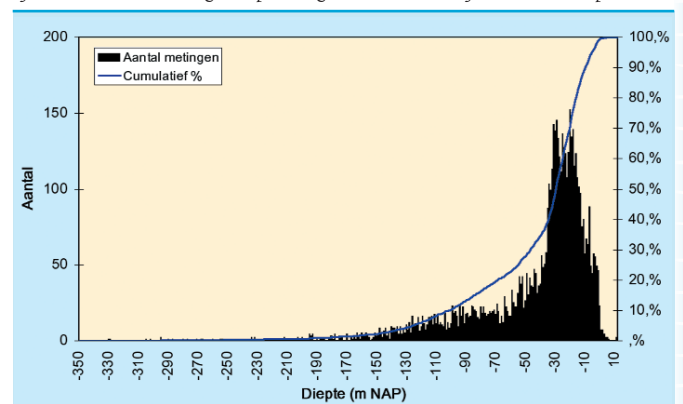
De dichtheid van het grondwater in Zuid-Holland is niet constant in ruimte en tijd, omdat de chlorideconcentratie van het water varieert. De stroming van grondwater wordt beïnvloed door deze verschillen in de dichtheid van het grondwater. Bij modellering van het grondwatersysteem moet daarom rekening worden gehouden met dichtheidseffecten.

Voor het simuleren van grondwaterstroming onder invloed van dichtheidsverschillen en het berekenen van het transport van chloride is gekozen voor een specifieke grondwatermodelcode<sup>2),3)</sup>, die recent ook gebruikt is bij verziltingsstudies van het Hoogheemraadschap van Rijnland, het Wieringerrandmeer en Texel. Hiermee is het mogelijk verschillen in de dichtheidsverdeling mee te nemen in de berekening van het snelheidsveld en in de parameteroptimalisatie. Gezien de variatie van concentraties en dichtheid in verticale richting is gekozen voor een groot aantal modellagen (zie kader op pagina 31). Hierdoor kunnen verschijnselen als een

Afb. 1: Hoeveelheid beschikbare grondwatergegevens per jaar (waarbij grondwaterstand én chloridegehalte zijn gemeten).



Afb. 2: Aantal metingen en percentage van het totaal als functie van de diepte.



zoet-zoutinversie of een overgangszone van zoet naar zout grondwater binnen één watervoerend pakket nauwkeurig worden berekend.

**Zoet en zout water**

Veel zorg is besteed aan een zo goed mogelijke weergave van de huidige verdeling van zoet en zout grondwater, omdat de initiële dichtheidsverdeling van het model veel invloed heeft op de modelresultaten. De huidige verdeling van zoet en zout water binnen Zuid-Holland is bepaald aan de hand van metingen van TNO<sup>4)</sup> en de provincie Zuid-Holland. Van de stijghoogten en chloridegehalten zijn gegevens beschikbaar vanaf 1867 tot 2001. De jaartallen 1903 en 1913 vallen op door de intensieve meetcampagnes in de duingebieden (zie afbeelding 1). De helft van de gebruikte chloridemetingen dateert van vóór 1960. Ook deze gegevens zijn gebruikt om de betrouwbaarheid van de initiële dichtheidsverdeling te verhogen.

De chloridemetingen zijn gebruikt om een driedimensionale initiële dichtheidsmatrix te bepalen, door een driedimensionale interpolatie uit te voeren volgens de methode van Hardy<sup>5)</sup>. De betrouwbaarheid van de initiële dichtheidsverdeling is sterk afhankelijk van het aantal chloridemetingen. Op grotere diepten (zie afbeelding 2) zijn minder metingen beschikbaar. Slechts tien procent van de metingen ligt dieper dan -100 m. NAP; twee en één procent van de metingen liggen respectievelijk dieper dan -157 en -187 m. NAP. Juist op deze dieptes komt vaak brak en zout grondwater voor. Het gevolg is, dat we de initiële dichtheidsverdeling onderin het systeem minder goed kennen dan de verdeling bovenin het systeem.

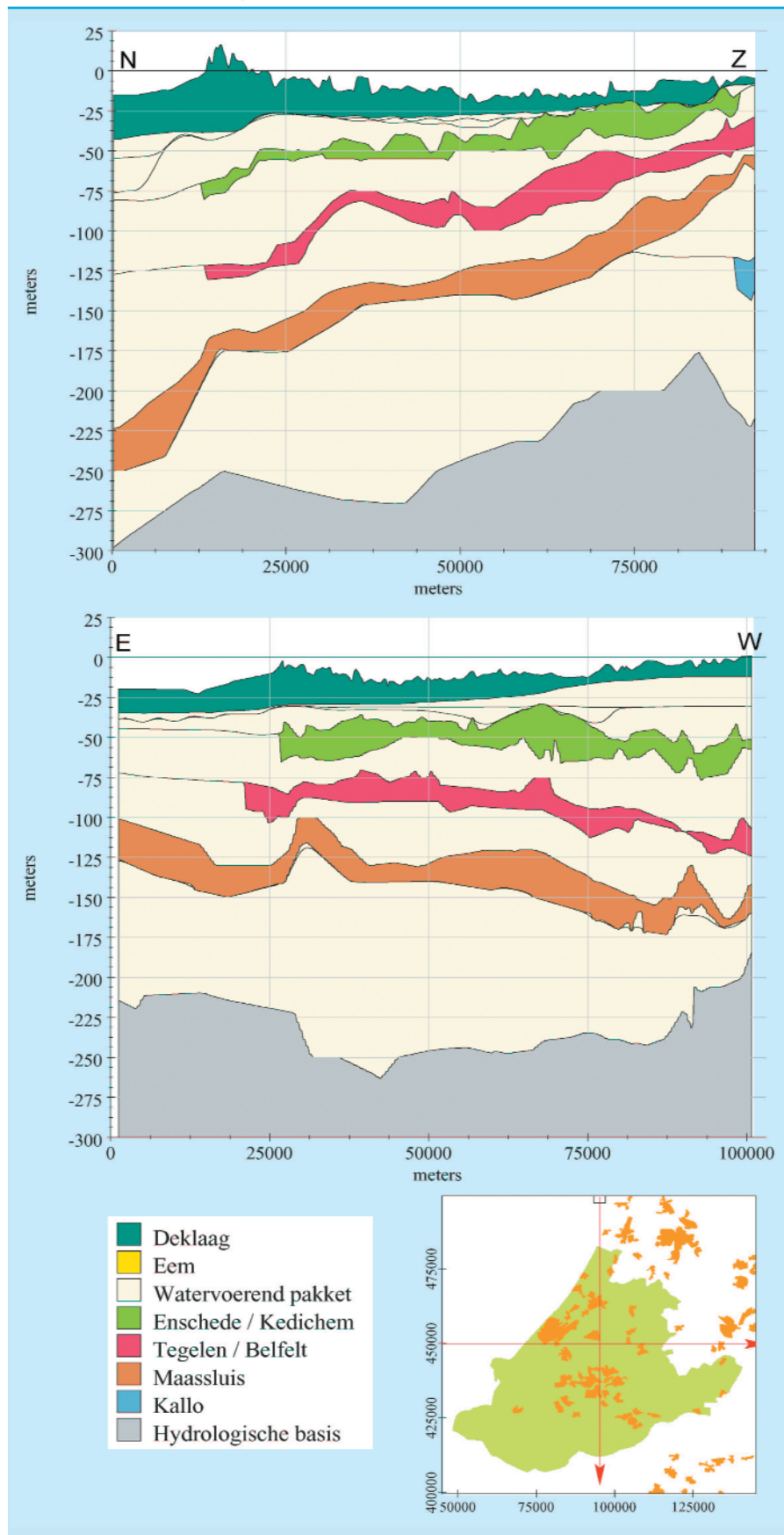
**Hydrogeologie**

Een geologische en hydrogeologische kartering van de ondergrond van Zuid-Holland en omgeving is beschikbaar binnen het Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem REGIS<sup>6)</sup>. Hierop zijn de initiële kD- en c-waarden gebaseerd (zie tabel). De deklaagweerstand is gebaseerd op weerstanden afkomstig van de onlangs uitgevoerde deklaagkartering op basis

van ondiepe DINO-boorgegevens<sup>7)</sup>. Deze deklaagweerstand is vervolgens gecorrigeerd voor de aanwezigheid van zandbanen in het gebied die de deklaag doorsnijden, waardoor de weerstand lokaal kleiner is.

De ijking van het uitgangsmodel is technisch uitgevoerd met behulp van een methode gebaseerd op Representatives<sup>8)</sup>. Kwaliteitsborging van het resulterende grondwatermodel is uitgevoerd in samenwerking met Kiwa.

Afb. 3: Twee geohydrologische profielen door de ondergrond van Zuid-Holland.



Het stoftransportmodel in kentallen.

aantal modelcellen	5.920.000
grootte modelcellen	250 x 250 m.
aantal rijen	370
aantal kolommen	400
aantal lagen	40
totaal oppervlak modelgebied	92,5 km <sup>2</sup>
totale diepte modelgebied	300 m.
totale simulatieperiode	200 jaar
tijdstap	1 jaar

Het transport van zout wordt niet-stationair gemodelleerd met behulp van deeltjes (initieel acht per gridcel). Het model is doorge-rekend vanaf heden tot en met het jaar 2200. Om te kunnen rekenen met grondwater met variërende dichtheid, zoals dat voorkomt in het Nederlandse kustgebied, zijn alle gemeten stijghoogten gecorrigeerd voor de dichtheid, wat resulteert in een omrekening naar zoetwaterstijghoogten. Tijdens de simulatie zal de dichtheid in het grondwatersysteem veranderen, waardoor ook de zoetwaterstijghoogten veranderen. In het model worden de zoetwaterstijghoogten voor elke tijdstap in elke gridcel opnieuw berekend.

Het model is ontwikkeld om de effecten van verzilting te kunnen berekenen binnen de watervoerend pakketten (zie kader). Aan de bovenrand is gekozen voor een vaste randvoor-waarde, bestaande uit gemiddelde peilen, zoals een gemiddeld zeeniveau in de Noordzee en gemiddelde polderpeilen in het poldergebied.

Daarom kunnen met het huidige grond-watermodel alleen uitspraken worden gedaan over het chloridegehalte beneden de deklaag.

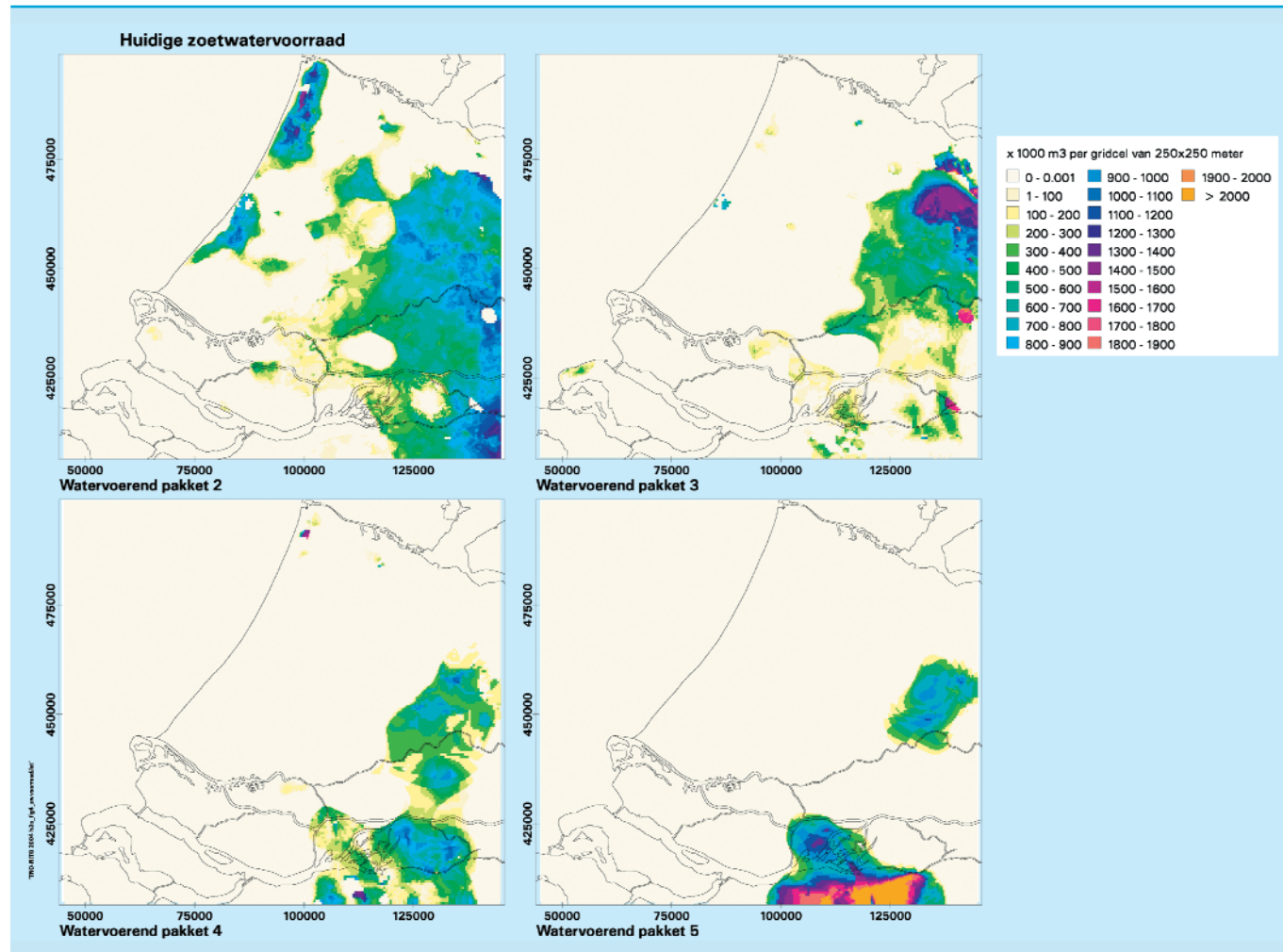
### Ondergrond van Zuid-Holland, vijf watervoerende pakketten

De verbinding, dikte, en de diepteligging van de watervoerende pakketten en scheidende lagen in het grondwatermodel van de provincie Zuid-Holland zijn gebaseerd op REGIS<sup>9</sup>. In de tabel is te zien hoe de geologische formaties zijn onderverdeeld in vijf watervoerende pakketten.

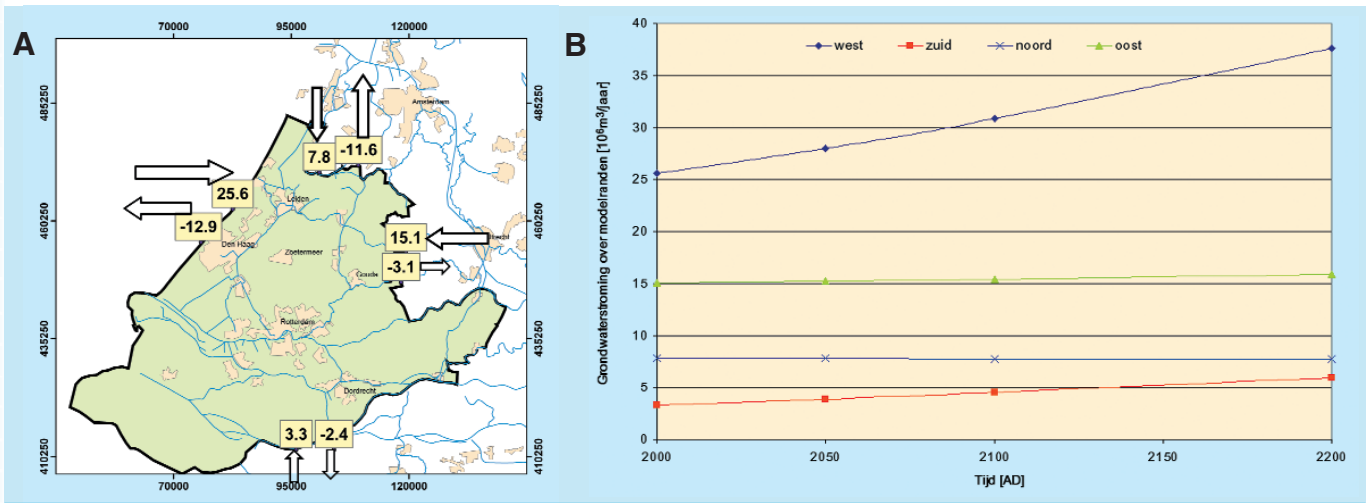
formatie	hydrologische indeling	watervoerend pakket
Westland, Nuenen groep, Twente, Eem	watervoerende lagen binnen de deklaag	1
Twente, Eem, Drente, Kreftenheye, Urk / Sterksel	watervoerend pakket	2
Enschede / Kedichem	scheidende laag	
Kedichem, Harderwijk	watervoerend pakket	3
Tegelen	scheidende laag	
Tegelen	watervoerend pakket	4
Maassluis, Kallo	scheidende laag	
Maassluis, Oosterhout	watervoerend pakket	5
Oosterhout	hydrologische basis	

De watervoerende pakketten zijn van elkaar gescheiden door slecht doorlatende kleilagen. Daar waar een slecht doorlatende laag in de ondergrond afwezig is, wordt wél een fictieve diepteligging (van de top van die laag) toegekend, maar is de dikte gelijk aan nul. Op deze wijze zijn alle onderscheiden watervoerende pakketten en scheidende lagen binnen het modelgebied gedefinieerd (zie afbeelding 3).

Afb. 4: Huidige zoetwatervoorraad per gridcel van 250 x 250 meter, afgebeeld voor vier watervoerende pakketten.







Afb. 5: A) Horizontale grondwaterstroming ( $10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ) over de randen van de provincie Zuid-Holland in het jaar 2000 en B) grootte van deze stroming in de tijd.

### Huidige situatie

Hoeveel zoet grondwater is nu aanwezig in Zuid-Holland? Momenteel bevindt zich binnen de grenzen van de provincie bijna 27 miljard kubieke meter zoet grondwater (minder of gelijk aan 150 mg Cl/l), waarvan bijna de helft in de watervoerende pakketten zit en de rest in de deklaag en de overige scheidende lagen (afb. 4).

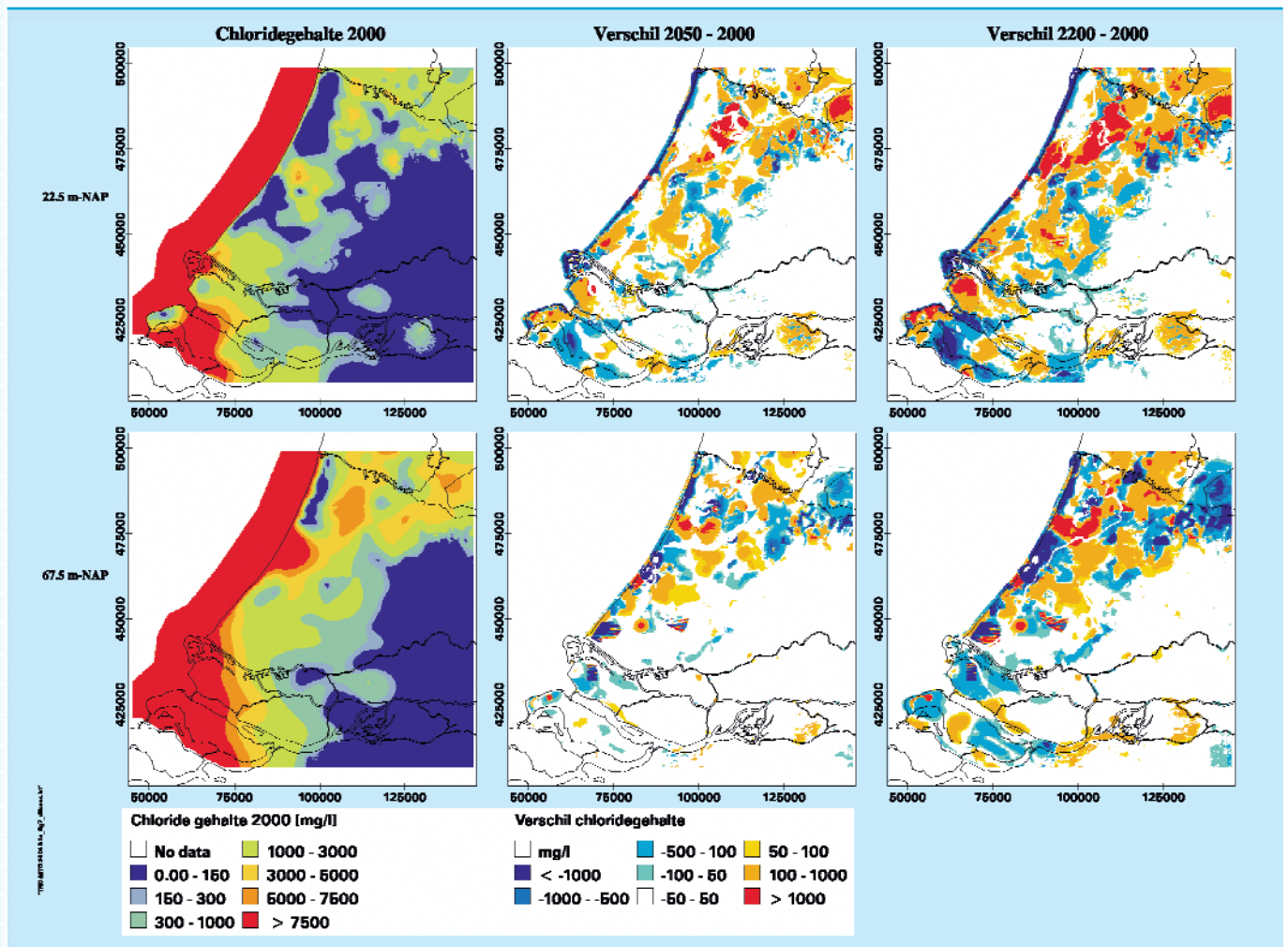
De verhouding tussen de hoeveelheden zoet, brak en zout grondwater varieert sterk voor de verschillende watervoerende pakketten. De hoeveelheid zoet water in de watervoerende pakketten 2, 3, 4 en 5 bedraagt respectievelijk 8,1, 1,8, 1,9 en 1,4 miljard kubieke meter. Het percentage zoet water in de watervoerende pakketten bedraagt respectievelijk 40, 12, 9 en 2

procent. Watervoerend pakket 2 bevat dus het meeste zoete grondwater. De zoetwatervoorraad bevindt zich vooral in het oosten van de provincie en onder de duinen.

### De toekomst

Neemt de omvang van de voorraad zoet grondwater de komende 200 jaar af of toe?

Afb. 6: Verandering van de chloridegehalten ten opzichte van het jaar 2000 (linkerkolom) op twee verschillende dieptes: rood = toename chloridegehalte, blauw = afname chloridegehalte.





Waar in Zuid-Holland vindt dit proces vooral plaats? Wat gebeurt er als we niets veranderen in het waterbeleid? Voor een periode van 200 jaar is berekend wat de effecten zijn, wanneer de huidige onttrekkings situatie wordt gehandhaafd. Hierbij is rekening gehouden met de meest waarschijnlijke prognoses voor bodemdaling<sup>9)</sup> en een absolute zeespiegelstijging van ongeveer een halve centimeter per jaar<sup>10)</sup>.

Uit de berekeningen blijkt dat zoet water toestroomt, uit de Utrechtse Heuvelrug ten oosten van de provincie (afbeelding 5a). Deze toestroming neemt in 200 jaar toe met ongeveer vijf procent (afbeelding 5b). De hoeveelheid grondwater die vanuit de Noordzee Zuid-Holland binnenstroomt, is zout. Ruim 295 duizend ton chloride komt hier het gebied binnen. Door de toename van deze stroming tussen 2000 en 2200 stijgt de over de westrand aangevoerde hoeveelheid chloride met ruim 30 procent.

In afbeelding 6 is te zien dat verzilting voornamelijk optreedt in de diep gelegen polders, zoals de polders ten noorden en westen van Gouda en buiten de provincie in de Haarlemmermeerpolder en Zuidelijk Flevoland. Zout water stroomt vanuit grotere diepte richting deze polders. De kwel flux zal hier toenemen met circa 20 procent over 200 jaar. Bovendien stijgt ook het zoutgehalte van het kwelwater. Het gevolg is een significante toename van de zoutbelasting in deze polders. De gemiddelde zoutbelasting aan de onderkant van de deklaag neemt tussen 2000 en 2200 toe met ruim 75 procent. De grootste toename in zoutgehalte treedt op in gebieden die nu al brak zijn. Deze gebieden zullen in de toekomst veel zouter worden. Voorbeelden zijn de Noord- en Zuidplaspolder, polder Groot-Mijdrecht en delen van de Haarlemmermeerpolder. Dit houdt in, dat met de toename van de zoutbelasting niet automatisch een afname van de zoetwater voorraad optreedt. Deze voorraad bevindt zich vooral in het oosten van de provincie, waar verzilting minder sterk optreedt. De grootste veranderingen treden op in het bovenste deel van het grondwatersysteem. De totale hoeveelheid zoet water in de bovenste 25 meter van het grondwatersysteem neemt in 200 jaar af met maximaal twaalf procent. Op een aantal plaatsen vindt echter ook verzoeting plaats: infiltrerend water vanuit hoger gelegen boezemwaterlopen en veenweidegebieden aan de randen van de polders zorgt voor een lokale verzoeting van het grondwater.

Naast de hierboven beschreven autonome ontwikkelingen is ook onderzocht wat het effect zou zijn van het stopzetten van 'brijnlozingen'<sup>\*\*</sup> op een viertal locaties (het Westland,

nabij Brielle, ten zuiden van Zoetermeer en ten noorden van Alphen aan de Rijn) en van het stopzetten van de grote zoetwateronttrekkingen van de waterleidingbedrijven. Het effect op de zoet-zoutverdeling in het totale systeem blijkt klein te zijn. Op de locaties van de brijnlozingen treedt verzoeting op in het eerste watervoerend pakket, omdat hier de onttrekking van het gietwater wordt stopgezet. Daarnaast treedt een lichte verzilting op in het tweede watervoerend pakket. Dit is als volgt te verklaren. Het chloridegehalte van het geïnjecteerde brijn (enkele duizenden mg Cl/l) is lager dan het chloridegehalte in het tweede watervoerende pakket waarin wordt geïnjecteerd. Door de lozing neemt het chloridegehalte lokaal dus iets af. Dit houdt op wanneer de brijnlozingen worden stopgezet; het grondwater wordt dan weer zouter. Als de drinkwaterwinningen worden stopgezet, treedt ter hoogte van de grote onttrekkingen een verzoeting op, doordat minder water met een hogere chlorideconcentratie wordt aangetrokken. De verschillen ten opzichte van de uitgangssituatie zijn zeer lokaal en bedragen rond de 100 mg Cl/l.

### Conclusies

Het verziltingsonderzoek in de provincie Zuid-Holland geeft een duidelijk beeld van de huidige verdeling van zoet en zout grondwater en de toekomstige veranderingen hierin, rekening houdend met een geprognosticeerde bodemdaling en zeespiegelstijging. Vooral in de bovenste 25 meter van het grondwatersysteem kunnen we een afname van de zoetwater voorraad en een significante toename van de zoutbelasting verwachten, terwijl in sommige delen van de provincie het grondwatersysteem lokaal zoeter wordt.

### Aanbevelingen

De verzilting en - op sommige locaties - de verzoeting van het diepere grondwater verlopen bijzonder traag. De verandering van de zoutbelasting in het oppervlaktewater blijkt daarentegen een uiterst dynamisch proces te zijn. Het chloridegehalte van sloten en plassen is in belangrijke mate bepalend voor de functies die aan deze wateren toegekend kunnen worden. Als men wil nadenken over maatregelen om de verzilting te beheersen, is het van belang om het fysische proces in de vingers te krijgen, dat voor deze belasting van het oppervlaktewater verantwoordelijk is.

Om aan te kunnen geven in hoeverre ongewenste verziltingseffecten verminderd of vermeden kunnen worden, wordt daarom aanbevolen de gevolgen van verzilting op maai-veldniveau in beeld te brengen. Dit kan worden bereikt door een gedetailleerd topsysteem in het model aan te brengen. Het is dan

tevens mogelijk om dit topsysteem te koppelen aan een dynamisch oppervlaktewatersysteem, zodat chloridefluxen van en naar waterlopen op gedetailleerde manier kunnen worden geanalyseerd. ¶

\* Zoet: chloridegehalte grondwater minder dan 150 mg/l, brak: chloridegehalte tussen 150 mg/l en 1000 mg/l; zout: chloridegehalte meer dan 1000 mg/l.

\*\* Brijnlozingen zijn lozingen van verzilt irrigatiewater uit de glastuinbouw en boomteeltsector. Tuinders onttrekken water uit het eerste watervoerend pakket en injecteren het na irrigatie resterende 'brijn' (gemiddeld minder dan enkele duizenden mg. Cl/l) bovenin het tweede watervoerende pakket.

### LITERATUUR

- 1) Minnema B., M. Kuijper en G. Oude Essink (2004). Bepaling toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland. TNO-rapport NITG 04-189-B.
- 2) Oude Essink G. (1998). Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D. Stromingen nr. 1, pag. 5-23.
- 3) Oude Essink G. (2001). Salt water intrusion in a three-dimensional groundwater system in The Netherlands: a numerical study. *Transport in porous media*. nr. 1, pag. 137-158.
- 4) TNO-NITG (1999). DINO, Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond.
- 5) Hardy R. (1971). Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. *J. Geophysical Research* nr. 76, pag. 1905-1915.
- 6) TNO-NITG (1998). REGIS, Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem.
- 7) Linden W. van der, A. Kremers en H. Weerts (2002). Landsdekkende karakterisatie topsysteem. TNO-rapport NITG 02-112-B.
- 8) Valstar J., D. McLaughlin, C. te Stroet en F. van Geer (2004). A representer-based inverse method for groundwater flow and transport applications. *Water Resources Research* nr. 40.
- 9) Haasnoot M., J. Vermulst en H. Middelkoop (1999). Impacts of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands. *Terrestrial areas*. RIZA.
- 10) Houghton J., Y. Ding, D. Griggs, M. Noguier, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell en C. Johnson (eds.) (2001). *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, United Kingdom and New York.