
Modellering van het zoet-zout grondwatersysteem op Texel

Arco van Vugt
Gualbert Oude Essink
Arie Biesheuvel

Ten behoeve van een onderzoek naar de werking van het grondwatersysteem op Texel, is een grondwatermodel ontwikkeld. Centraal in het onderzoek stonden de verziltingsproblematiek van het watersysteem en mogelijke maatregelen om verzilting af te remmen. Om het grondwatersysteem goed te kunnen modelleren is rekening gehouden met dichtheidsverschillen, die van grote invloed zijn op de grondwaterstroming. Om te komen tot een zo goed mogelijke inschatting van de dichtheidsverdeling is het initiële dichtheidsveld op basis van geconstrueerde geochemische profielen verbeterd met behulp van twee modelcodes (MODFLOW en MOCDENS3D). Uiteindelijk kon hiermee een goed kalibratieresultaat worden bereikt. Met behulp van het gekalibreerde model zijn een zestal scenario's berekend. De resultaten van de scenario's hebben bijgedragen aan een verbetering van het inzicht in het watersysteem en in het effect van maatregelen om de verzilting af te remmen. De studie onderstreept nog eens het belang van het frequent uitvoeren van metingen van het chloridegehalte. Dit is niet alleen noodzakelijk vanwege het verbeteren van het geochemisch beeld van het watersysteem, maar dient tevens ter correctie van de gemeten stijghoogte (die daardoor bruikbaar zijn voor een modelstudie als deze).

Inleiding

Het eiland Texel is het meest zuidelijke en grootste waddeneiland. Het eiland wordt bevolkt door circa 13.000 inwoners. Met name in de zomer is het eiland een populaire vakantiebestemming waardoor het aantal toeristen op het eiland kan oplopen tot 60.000. Aan de westkant van het eiland is een duinenrij gelegen, die wordt onderbroken door een periodiek overstroomde kweldervallei, de Slufter. Aan de kant van de Waddenzee (oostkant) liggen poldergebieden, waar het grondgebruik overwegend landbouw is.

Arco van Vugt is werkzaam bij Witteveen + Bos, sector Water, afdeling Integraal Waterbeheer, L. Armstrongweg 6, Postbus 10095, 1301 AB Almere, a.vVugt@witbo.nl.

Gualbert Oude Essink is werkzaam bij NITG-TNO, Grondwater, Princetonlaan 6, Postbus 80015, 3508 TA Utrecht, g.oudeessink@nitg.tno.nl én bij Vrije Universiteit, Aardwetenschappen, Hydrologie & Hydrogeologie, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, oudg@geo.vu.nl.

Arie Biesheuvel is werkzaam bij Witteveen + Bos, sector Water, afdeling Integraal Waterbeheer, Van Twickelstraat 2, Postbus 233, 7400 AE Deventer, a.biesheuvel@witbo.nl.

Texel, ook wel Nederland in het klein genoemd, kampt met een aantal problemen in de waterhuishouding. De landbouw kampt met verzilting, terwijl voor de natuurgebieden onvoldoende water van goede kwaliteit voorhanden is. Tevens is er in de zomer als gevolg van het toerisme een piek in het gebruik van drinkwater en daarmee ook in de lozing van rioolwater. De zoetwatervoorraad op Texel is te beperkt om deze problemen structureel op te lossen.

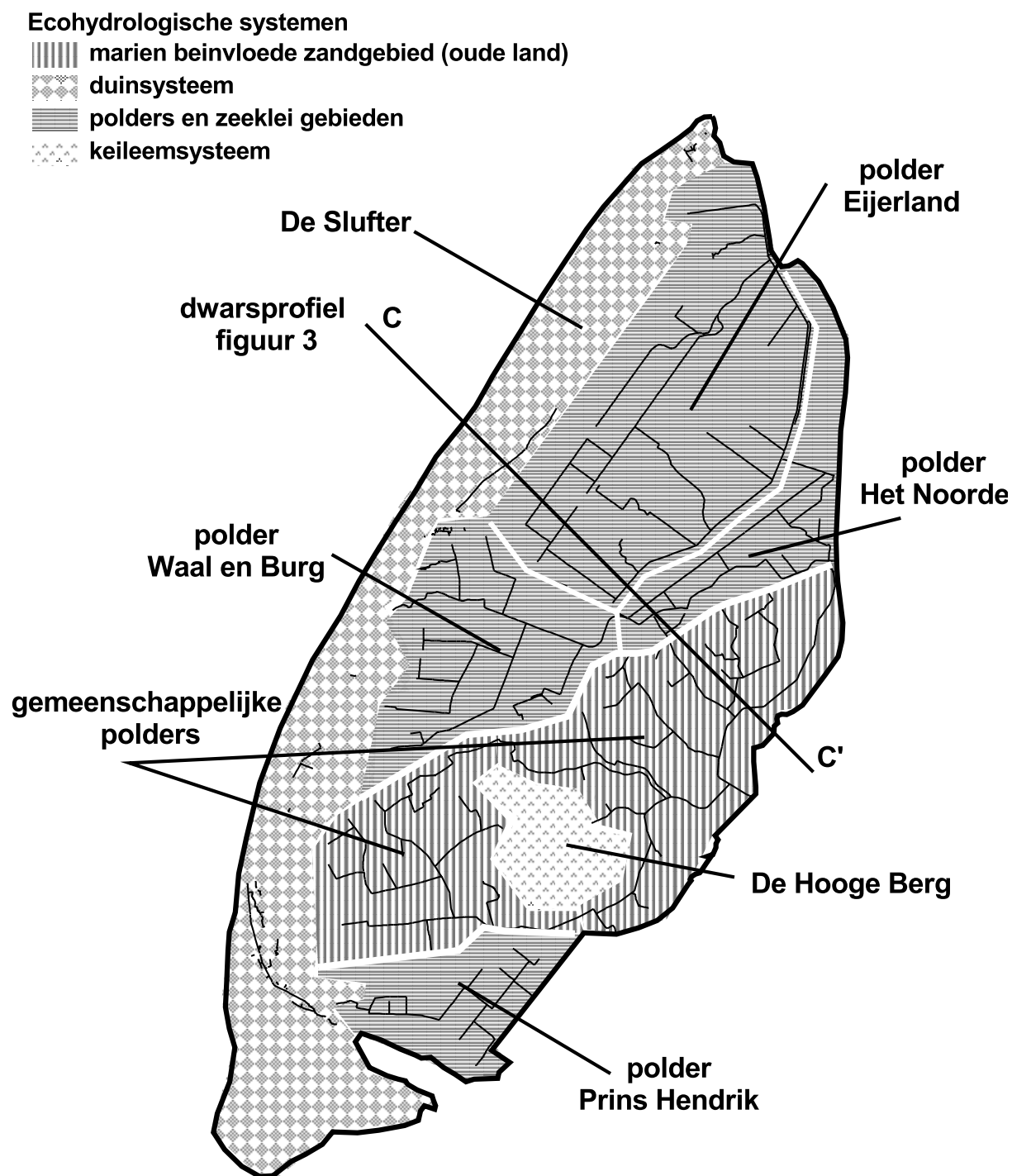
De Provincie Noord-Holland, het Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen, het Waterschap Hollands Kroon en de gemeente Texel willen de problematiek gezamenlijk oppakken. Daartoe hebben zij Witteveen+Bos opdracht gegeven voor een 'Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel' (Witteveen+Bos, 2000). Dit onderzoek had als doel het verkrijgen van meer samenhangende kennis over het functioneren van het watersysteem onder verschillende omstandigheden zoals klimatologische veranderingen en zeespiegelstijging. Daartoe is in samenwerking met de Universiteit van Utrecht (Interfacultair Centrum Hydrologie Utrecht, ICHU) een grondwater- en oppervlaktewatermodel gebouwd van geheel Texel. Het oppervlaktewatermodel (met behulp van DUFLOW) blijft in dit artikel buiten beschouwing.

Grondwatermodellering Texel

Om meer inzicht in de grondwaterstroming en de verzilting van het ondiepe grondwater is een grondwatermodel van Texel ontwikkeld waarbij de grondwaterstroming als gevolg van dichtheidsverschillen is meegenomen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de code MOCDENS3D (Oude Essink, 1998, 2000). Deze code biedt de mogelijkheid om op dynamische wijze de verdeling van zoet en zout grondwater te modelleren. Dit artikel gaat met name in op de *kalibratie* van dit zoet-zout grondwatermodel. Daarnaast wordt een voorbeeld gegeven van de toepassing van het model ter beantwoording van vragen van waterbeheerders. Het artikel wordt afgesloten met enkele conclusies.

Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In grondwatersystemen waar de dichtheidsverdeling niet-uniform is moet men eigenlijk rekening houden met het effect van verschillen in grondwaterdichtheid op de grondwaterstroming, aangezien zout grondwater zwaarder is dan zoet grondwater. Zo kan in een 'vrij' natuurlijk hydrogeologisch systeem (zonder externe spanningen zoals grondwateronttrekkingen of peilverlagingen) zout grondwater door drukverschillen zoet grondwater wegdrukken (de welbekende zoutwaterintrusie in watervoerende pakketten). Daarentegen kan zoet grondwater, doordat het lichter is, juist op het zoute grondwater blijven drijven en een min of meer geïsoleerd grondwatersysteem in stand houden (denk aan de zoetwaterbellen in het Nederlandse duingebied). Indien grondwatermodellen worden gemaakt van dergelijke systemen, is het dus essentieel dat het dichtheidseffect wordt meegenomen. In dit onderzoek is dat gedaan voor het grondwatersysteem van Texel.



Figuur 1: Schematische weergave ecohydrologische systemen op Texel en namen van de belangrijkste polders.

Korte beschrijving van het grondwatersysteem

Het grondwater op het eiland Texel is globaal in te delen in 4 (eco)hydrologische systemen (zie figuur 1):

- het duinsysteem, dat wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van zoetwaterbellen. Natuurlijke grondwateraanvulling infiltreert in de duinen en houdt de zoetwaterbel in stand. Het grondwater stroomt af naar de randen. Een deel van het grondwater kwelt op

- in de binnenduinrand waar het wordt afgevoerd via duinrellen of sloten;
- het keileemsysteem (De Hooze Berg), dat eveneens wordt gekenmerkt door het voorkomen van een zoetwaterbel. Tot 1989 werd aan dit systeem water onttrokken voor de bereiding van drinkwater;
- het marien beïnvloede zandgebied, dat is gelegen langs de lijn Oosterend-Den Burg-Westerduinen. De bodem bestaat niet alleen uit zand, maar ook uit zeeklei dat in het verleden in geulen en kreken is afgezet. Lokaal worden in de ondergrond dunne zoetwaterlenzen aangetroffen;
- de mariene kleigebieden, die als polders in gebruik zijn (o.a. de Prins Hendrik polder, polder Waal en Burg, polder Het Noorden en de Eijerlandse polder). De laag gelegen polders kennen een hoge zoutbelasting als gevolg van veel zoute kwel. Als gevolg van het neerslagoverschot in de winter kunnen tijdelijke dunne zoetwaterlenzen voorkomen.

Toegepaste modelcodes

Grondwaterstroming in watervoerende pakketten waar een variabele dichtheid heerst kan niet gemodelleerd worden met een gewoon grondwatermodel waarin een constante dichtheid wordt gebruikt. De driedimensionale modelcodes die gebruikt zijn in het Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel zijn een aangepaste versie van MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988), namelijk met de zogenaamde 'density package' van KIWA (Schaars en Van Gerven, 1997) en MOCDENS3D (Oude Essink, 1998 en 2000). Stoftransport in MOCDENS3D wordt gemodelleerd door de stoftransportvergelijking op te splitsen in twee delen: (a) een advection term die wordt opgelost met een deeltjesverplaatsingstechniek (m.b.v. de methode der karakteristieken), en (b) een dispersie term die wordt opgelost met een eindige differentie methode. Een belangrijke eigenschap van deze manier van oplossen van de advection-dispersie vergelijking is dat grootschalige zoet-zout grondwatersystemen kunnen worden gemodelleerd zonder dat ernstige numerieke problemen optreden. Door deze opsplitsing kunnen namelijk numerieke dispersie en oscillaties binnen de perken worden gehouden, ook als de numerieke cellen groot en de (longitudinale) dispersiviteiten klein zijn (in de Nederlandse en Belgische kustgebieden wordt meestal gerekend met kleine dispersiviteiten). Met name in deze numerieke eigenschap verschilt MOCDENS3D van de codes die gebruik maken van de standaard eindige elementen en differentie methoden. Met deze code is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren, waarbij tevens rekening wordt gehouden met moleculaire diffusie (gelijk gesteld aan $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) en hydrodynamische dispersie. De longitudinale dispersiviteit in dit model is gelijk gesteld aan 2 m, terwijl de horizontale en verticale transversale dispersiviteiten gelijk zijn aan 0,2 m.

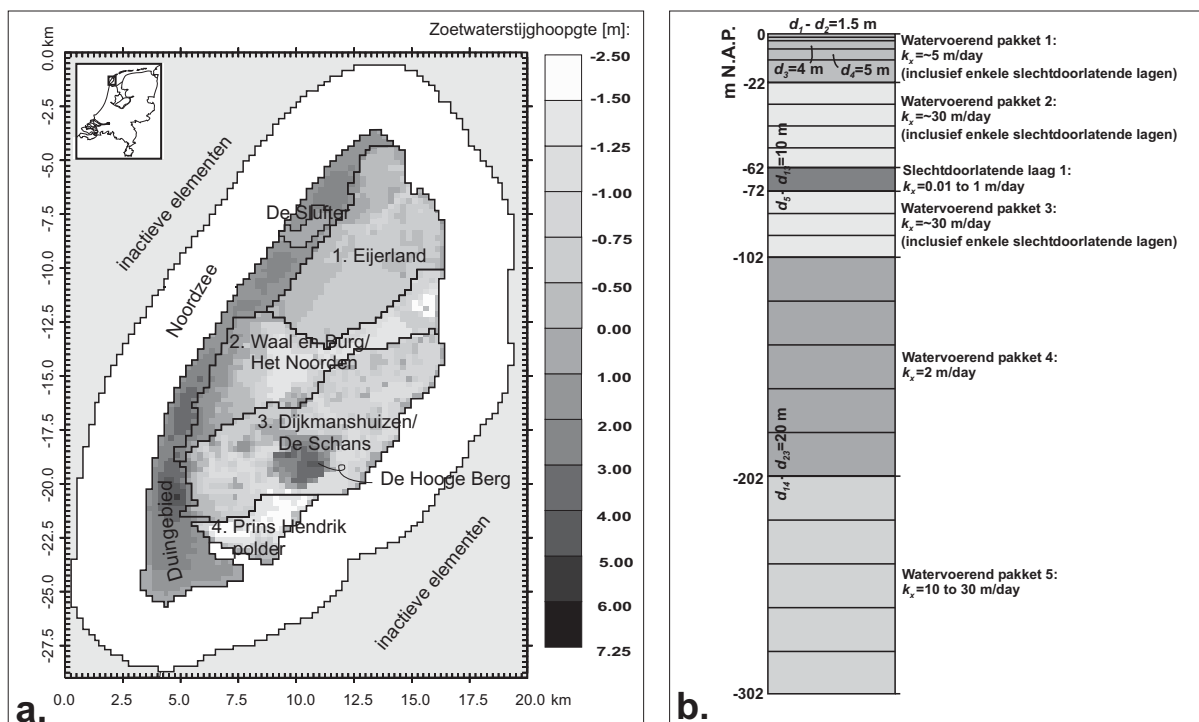
De vergelijking voor grondwaterstroming, die is aangepast voor dichtheidsverschillen in het grondwater (Oude Essink, 1998), wordt opgelost met de '*Strongly Implicit Procedure*' van MODFLOW. Het convergentie-criterium voor de grondwaterstromingsvergelijking is 10^{-5} m. De vergelijkingen voor grondwater en stoftransport zijn gekoppeld omdat de dichtheid verandert door het transport van zout in de ondergrond. Numeriek wordt hiermee rekening gehouden door de tijdstap van de grondwaterstromingsvergelijking klein genoeg te kiezen: in de praktijk leek na enkele gevoeligheidstesten een waarde van 1 jaar goed genoeg te zijn. MOCDENS3D is recent ook gebruikt voor het modelleren van de grondwatersystemen van de Wieringermeerpolder (Grontmij Noord-Holland, 2001) en het Hoog-

heemraadschap van Rijnland (KIWA, 2003).

Om in MODFLOW rekening te kunnen houden met dichtheidsverschillen is gebruik gemaakt van het zogenaamde density package (Schaars en Van Gerven, 1997). In deze module dient per cel een (relatieve) dichtheid te worden opgegeven. Ook voor het rekenen in MOCDENS3D is een initieel dichtheidsveld nodig. In tegenstelling tot MOCDENS3D is MODFLOW + density package niet in staat om met een niet-stationair dichtheidsveld te rekenen. Voor de berekeningen is daarom bij de lange termijn scenario's gebruik gemaakt van MOCDENS3D, omdat op deze termijn het dichtheidsveld niet als stationair beschouwd kan worden. Voor de korte termijn scenario's is gebruik gemaakt van MODFLOW + density package. Er is gekozen voor MODFLOW binnen PMWIN, omdat automatische kalibratie daarmee relatief eenvoudig uit te voeren is en er gemakkelijk allerlei invoer gegenereerd kan worden.

Modelschematisatie van het grondwatersysteem

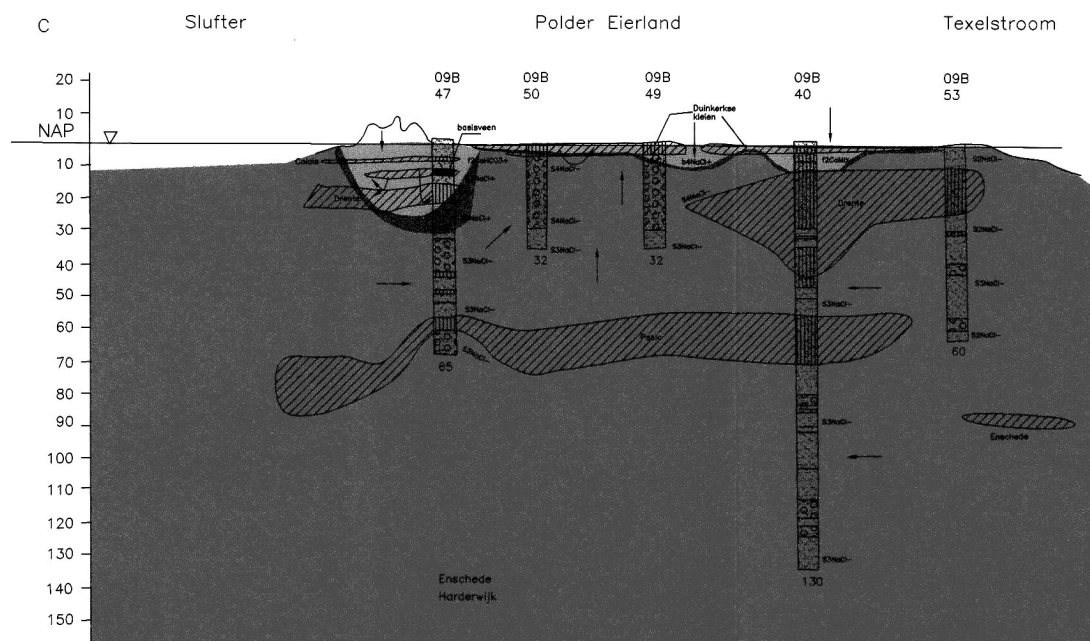
Het grondwatermodel van Texel heeft de volgende afmetingen: 29 km bij 20 km bij 302 m diep. Het systeem is als volgt opgedeeld: 80 rijen van 250 m breed in oost–west-richting, 116 kolomen van 250 m breed in Noord-Zuid richting en 25 lagen met een dikte die varieert van 1,5 m tot 20 m. Door de vorm van het eiland is zo'n 60% van de cellen (~125.000) actief in de numerieke berekening. Op zo'n drie kilometer vanuit de kustlijn, is over de verticaal een 'no-flow'-randvoorwaarde opgelegd. In figuur 2b is een blokdiagram de schematisatie van de ondergrond van Texel opgenomen. In het duingebied is een natuurlijke grondwater aanvulling aangebracht (varierend van 0,46 tot 1,18 mm/dag). Voor poldergebieden zijn vaste peilen opgelegd van N.A.P. –2,05 m (in de Prins Hendrik polder) tot N.A.P. +4,75 m (omgeving De Hooie Berg) en in de Noordzee en Waddenzee van N.A.P. –0,10 m.



Figuur 2: Schematische weergave van het model: **a:** vorm en afmetingen van het model, **b:** schematisatie van de ondergrond: aantal en dikten van lagen.

Invoer MODFLOW density package op basis van metingen

Op basis van boorbeschrijvingen en chloridemetingen zijn 4 dwarsprofielen en 1 lengteprofiel van de ondergrond opgesteld. In deze profielen is naast de bodemopbouw een geochemische Stuyfzand-classificatie (Stuyfzand, 1986) van het grondwater opgenomen. Door deze classificatie is het inzicht in de zoet-zout verdeling van de ondergrond vergroot, waarbij met name aandacht is besteed aan de vorm en diepte van de zoetwaterbellen onder de duinen. In figuur 3 is een voorbeeld opgenomen van één van de geconstrueerde dwarsprofielen.



Figuur 3: Voorbeeld van een geconstrueerd dwarsprofiel op basis van boringen en chloridemetingen. In blauw zoet water, in donkergroen / zwart brak water en in rood zout water.

De chlorideverdeling in de ondergrond zoals die in de profielen tot uiting komt, vormt het uitgangspunt voor de constructie van het initiële dichtheidsveld. Dit dichtheidsveld vormt de invoer van zowel het density package als MOCDENS3D. De dichtheid is berekend uit de chlorideverdeling met behulp van de volgende lineaire formule:

$$\rho(C) = \rho_f \left(1 + \alpha \frac{C}{C_s} \right)$$

waarin:

- $\rho(C)$ = dichtheid van het grondwater (kg/m^3);
- ρ_f = referentiedichtheid, meestal dichtheid van zoet water zonder opgeloste stoffen en bij gemiddelde bodemtemperatuur. Hier gesteld op 1000 kg/m^3 ;
- ρ_s = dichtheid van zout water bij gemiddelde bodemtemperatuur (kg/m^3). De dichtheid van zeewater is hier gesteld op 1025 kg/m^3 ;
- α = $(\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ = relatieve dichtheidsverschil (-);

C	=	chlorideconcentratie van het water (mg Cl ⁻ /l);
C_s	=	referentie chlorideconcentratie van het water (mg Cl ⁻ /l). De chlorideconcentratie van zeewater is gesteld op 18.630 mg Cl ⁻ /l.

De constructie van het dichtheidsveld kan niet simpelweg worden verkregen door een interpolatie uit te voeren tussen de peilbuisfilters, hetgeen met name het geval is als het aantal peilbuismetingen beperkt is (er zijn in deze studie ongeveer 125.000 actieve cellen en slechts 111 peilbuismetingen). Met een interpolatie zou een dichtheidsveld worden verkregen dat niet in overeenstemming is met de werkelijkheid, omdat lokaal scherpe overgangen in chlorideconcentratie (en dichtheid) kunnen voorkomen. Voor een goede inschatting van het dichtheidsveld ten behoeve van een modellering is de aanwezigheid van kennis bij de modelleur over het geohydrologisch én het hydrogeochemisch systeem dan ook onontbeerlijk. Voor de constructie van het initiële dichtheidsveld is echter in eerste instantie dus gebruik gemaakt van de geconstrueerde profielen.

Gevoeligheidsanalyse en eerste kalibratiestappen met MODFLOW

Na invoer van het initiële dichtheidsveld, op de hierboven beschreven wijze, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de belangrijkste bodemparameters:

- drainageweerstand;
- bodemweerstand hoofdwaterlopen;
- hydraulische weerstand van de deklaag in de polders;
- de horizontale doorlatendheid van het freatisch pakket in de duinen;
- de weerstand van de keileem (Formatie van Drenthe);
- de weerstand van de potklei (Formatie van Peelo).

De gevoeligheid van deze bodemparameters is in beeld gebracht voor zowel de stijghoogten als de berekende afvoer per poldergemaal (in combinatie met het oppervlaktewatermodel) (Witteveen+Bos, 2000). Na deze gevoeligheidsanalyse is begonnen met de kalibratie van het model. De kalibratie is uitgevoerd door de berekende zoetwaterstijghoogten te vergelijken met de gemeten stijghoogten (door middel van de bepaling van de restfout). De gemeten stijghoogten zijn gecorrigeerd voor dichtheidsverschillen en uitgedrukt in equivalente zoetwaterstijghoogte. Beide gebruikte modelcodes gebruiken het dichtheidsveld namelijk alleen om het effect van dichtheidsstroming te verdisconteren en niet om de berekende zoetwaterstijghoogten om te kunnen zetten in werkelijke stijghoogten behorend bij het chloridegehalte. Bij de eerste runs zijn enkele lokale aanpassingen in het modelconcept uitgevoerd. Zo is de Slufter bijvoorbeeld ingebracht in het *drain package* en ook op de overgang van de duinen naar de polders (binnenduintrand) zijn enkele verbeteringen in de begrenzing aangebracht. Bij de volgende runs is handmatig gekalibreerd, waarmee uiteindelijk een gemiddeld absoluut verschil (MAE) van 60 cm werd bereikt. Hoewel het model redelijk grof gediscretiseerd is en in de duinen de stijghoogten op korte afstand sterk kunnen variëren, was er zowel bij de opdrachtgevers als de modelleurs nog geen tevredenheid met dit resultaat.

Daarom is besloten om het model verder te optimaliseren met de automatische kalibratieroutine PEST (Doherty e.a., 1994). PEST was echter niet in staat om binnen fysisch realistische grenzen voor de parameters tot een significante verbetering te komen

van het kalibratieresultaat. Daaruit is geconcludeerd dat het model in conceptueel opzicht verbeterd diende te worden. De grondwateraanvulling die in het model was ingevoerd, kon met behulp van GIS-bewerkingen redelijk goed worden ingeschat. Hoewel de grondwateraanvulling natuurlijk altijd een moeilijk nauwkeurig vast te stellen variabele is, waren er geen directe aanwijzingen voorhanden die duiden op mogelijke fouten in de ingevoerde waarden van deze variabele.

Een parameter die moeilijk met behulp van PEST geoptimaliseerd kan worden is de dichtheid. De dichtheid is immers een continu verlopend veld dat in dit model varieert tussen 1000 en 1025 kg/m³. Dat betekent dat PEST per cel een optimalisatie zou moeten uitvoeren van de dichtheid. Bij een model met zo'n 125.000 actieve cellen is dat ondoende. De conclusie die hieruit werd getrokken, was dat het dichtheidsveld op een andere manier verbeterd diende te worden en dat de inschatting die gemaakt was op basis van de profielen niet tot de gewenste betrouwbaarheid ten aanzien van het dichtheidsveld heeft geleid. Daarom is besloten om te proberen het dichtheidsveld zoals dat in de density package was ingevoerd te verbeteren met behulp van MOCDENS3D.

Kalibratie van het model met MOCDENS3D en bepaling dichtheidsveld

Een manier om te analyseren of het gebruikte dichtheidsveld een beetje in orde is (voorzo-
ver dat mogelijk is met een model met zo'n 125.000 cellen en slechts 111 peilbuismetingen)
is te kijken naar het snelheidsveld. Omdat hier sprake is van variable dichtheidsstroming
bepaalt de dichtheid en dus indirect het chloridegehalte mede het snelheidsveld. Wij gaan
nu even uit van het chloridegehalte. Nu blijkt dat in de onderhavige zoet-zout grondwater
systeem het chloridegehalte een behoorlijke invloed heeft op het snelheidsveld, met name
in het verticale vlak. Als er bijvoorbeeld uit de interpolatie rolt dat een cluster cellen een
hoge concentratie heeft ten opzichte van de concentraties in de onderliggende cellen, dan is
er sprake van een inversie hetgeen betekent dat het grondwater in deze cluster cellen naar
beneden wil stromen en het zoete grondwater ernaast en eronder omhoog. Dat kan gepaard
gaan met zeer hoge verticale snelheden, die in de omgeving van de cluster zelfs gemakke-
lijk dominant kunnen zijn ten opzichte van de natuurlijke grondwaterstroming, veroor-
zaakt door peilverschillen, natuurlijke grondwateraanvulling of grondwateronttrekkingen.
Als het model vervolgens een aantal jaren wordt doorgerekend, dan kan het grondwater uit
zo'n cluster snel enkele tientallen meters wegzakken. Als dit alles gebeurt in een goed
watervoerend pakket, dan is het onwaarschijnlijk dat de inversie in werkelijkheid nog te
zien zou zijn (het zou al verdwenen moeten zijn), dus betrof het waarschijnlijk een nume-
rieke inversie die is ontstaan door de interpolatie van het driedimensionale dichtheidsveld.
Het snelheidsveld vertoont ter plaatse van de numerieke inversies zwaar zout grondwater
dat snel omlaag stroomt en licht zoet grondwater dat ernaast snel omhoog stroomt. Er zijn
in deze studie twee technieken gebruikt om het dichtheidsveld te verbeteren. Ten eerste
werden handmatig (of met GUI PMWIN, Chiang en Kinzelbach, 2001) de clusters met hoge
chloridegehalten, die de waarschijnlijke numerieke inversies veroorzaken, lagere chloride-
gehalten gegeven, en andersom. Lastig is natuurlijk in te schatten of het een numerieke
inversie betreft of een natuurlijke inversie. Zodoende zijn kennis over de geohydrologie en
hydrogeochemie eigenlijk onontbeerlijk. Ten tweede werd het model voor 10 jaar met gro-
tere nauwkeurigheid doorgerekend: initiëel meer deeltjes per cel, met een kleinere tijdstap,
en met een véél grotere (onrealistische) moleculaire diffusie. Het uiteindelijke resultaat

was een meer gestroomlijnde dichtheidsverdeling, waar de grootste numerieke inversies uit waren verdwenen (maar misschien ook wel fysische inversies). Het aldus gecreëerde dichtheidsveld heeft als basis gediend voor de verdere berekeningen. Dit alles heeft natuurlijk ook effect gehad op de zoetwaterstijghoogte in het systeem, en tevens op de kwel en zoutbelasting bovenin het grondwatersysteem. In een aantal gevallen is het dichtheidsveld zelfs veranderd om de zoetwaterstijghoogte en de kwel beter te laten overeenkomen met de gemeten waarden. Een andere, weliswaar grove en hier dus niet toegepaste, manier om numerieke inversies weg te halen is de driedimensionale dichtheidsmatrix te doorlopen en alle inversies automatisch te verwijderen. Nadeel is hierbij wel dat ook alle fysisch verklaarbare inversies zullen verdwijnen (eventueel zou je zones apart kunnen vrijwaren van aanpassingen, maar het was in dit onderzoek lastig aan te geven waar deze fysische inversies precies lagen).

Al met al leidde bovenstaande procedure om te komen tot een betere kalibratie en tot het nieuwe dichtheidsveld tot een verbetering van de zoetwaterstijghoogten (met name in de duinen), maar helaas ook tot een verslechtering van de berekende chloridegehalten ten opzichte van de chloridemetingen.

Afronding kalibratie en kalibratieresultaat van het model met MODFLOW

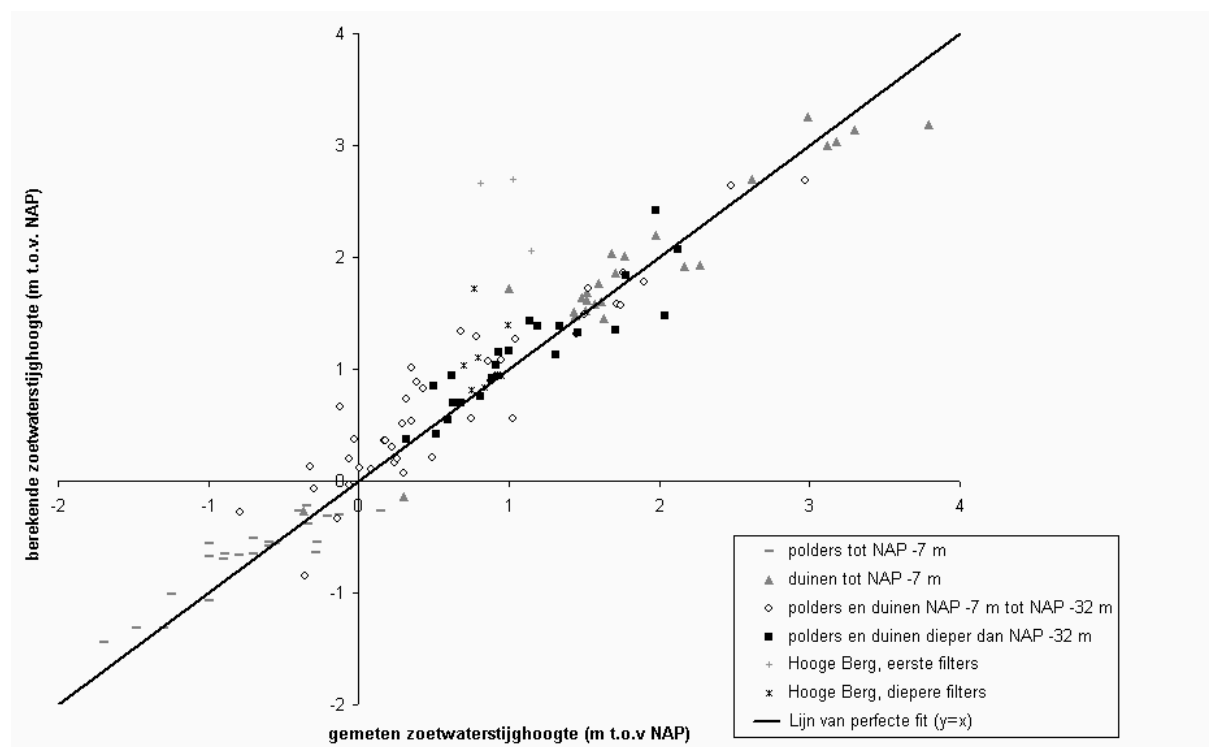
Na invoer van het nieuwe dichtheidsveld zijn de prestaties van het model verder verbeterd en gecontroleerd door:

- hernieuwde kalibratie op grondwaterstanden en stijghoogten;
- kalibratie op gemaalafvoeren uit de polders;
- verificatie met behulp van kwelindicerende en zoutminnende vegetatie;
- verificatie op gemeten chlorideconcentraties in het oppervlaktewater (in combinatie met het oppervlaktewatermodel in DUFLOW).

Met het nieuwe dichtheidsveld is de kalibratie van het model met de modelcode MODFLOW+‘density package’ voortgezet. Daarbij is niet alleen gekalibreerd op grondwaterstanden en stijghoogten, maar tevens op de totale afvoer uit de polder, die trouwens sterk varieert als een functie van de tijd. Er is tevens ook nog gekeken naar de zoutbelasting per poldergebied. Omdat de zoutbelasting per polder de resultante is van de twee fysische processen grondwaterstroming en stoftransport (en dus de resultante is van alle fouten in hydraulische doorlatendheid, randvoorwaarden, effectieve porositeit, initiële chloride concentratie, etc.), is het kalibreren op deze variable haast ondoenlijk. Met name een onjuiste chloride-concentratie heeft natuurlijk een direct effect (is de chloride concentratie op een bepaald punt 1000 of 2000 mg Cl⁻/l? De zoutbelasting kan hierdoor wel een factor twee verschillen), maar goede chloridemetingen zijn helaas beperkt.

Ten behoeve van de kalibratie is de berekende afvoer per polder vergeleken met het te verwachten uitgemaalendebiet op basis van het aantal draaiuren (van de pompen). Tevens is gebruik gemaakt van gegevens uit het Waterbeheersplan Hollands Kroon (WSHK en HHUS, 1998), die echter maar voor een deel van de modelperiode beschikbaar waren. Er zijn een aantal kalibratieslagen uitgevoerd. Vanwege het feit dat het uitgemaalendebiet per poldergemaal niet rechtstreeks gemeten wordt, is met behulp van het aantal draaiuren en de capaciteit per pomp een inschatting van het uitgemaalendebiet gemaakt. De hiermee

verkregen afvoeren zijn per polder vergeleken met de berekende afvoeren, waaruit is gebleken dat de gemaalafvoeren tot op circa 15% nauwkeurig worden berekend, met uitzondering van polder Eijerland. In polder Eijerland loopt de onnauwkeurigheid op tot 80%, waarbij in ogenschouw moet worden genomen dat de gemaalafvoeren variëren. Bij pogingen om deze onnauwkeurigheid terug te brengen, bleek dat de restfout in de stijghoogte hierdoor onacceptabel zou toenemen. Daarom is afgezien van verdere aanpassingen, temeer omdat (een deel van) de fout in de afvoer ook verklaard zou kunnen worden uit afname van de capaciteit van de pompen als gevolg van slijtage of verzandingen. Het verdient daarom aanbeveling de werkelijke gemaalafvoeren per polder te meten als een functie van de tijd.



Figuur 4: Berekende zoetwaterstijghoogte uitgezet tegen gemeten zoetwaterstijghoogte, onderscheiden per deelgebied en naar diepte.

In figuur 4 zijn de (voor dichtheidsverschillen gecorrigeerde) gemeten stijghoogten uitgezet tegen de zoetwaterstijghoogten die met het gekalibreerde model zijn berekend. Daarbij is onderscheid gemaakt naar de diepte en locatie van de filters. In de duinen bovenin het watervoerende pakket is sprake van opbolling en inzijing, waardoor hier de hoogste stijghoogten worden berekend. De cluster polders (met zoetwaterstijghoogte tot N.A.P. -7 m) ligt het laagst. Op grotere diepte (met name vanaf N.A.P. -32 m) worden over het algemeen hogere zoetwaterstijghoogten berekend, wat niet alleen duidt op het voorkomen van (lokale) kwelsituaties, maar ook het gevolg is van het zouter worden van het grondwater op grotere diepte. Er geldt namelijk dat hoe zouter het grondwater is, hoe hoger de equivalente zoetwaterstijghoogte zal zijn. De ondiepe filters op de Hooge Berg kennen een grote afwijking tussen gemeten en berekende stijghoogte. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat op de Hooge Berg de verhouding van de celgrootte ten opzichte van het relatief steile verhang en de complexe lokale geohydrologische situatie niet optimaal is. Anders gezegd: met de gebruikte celgroottes is het model niet voldoende in staat om de lokale situatie op de Hooge Berg voldoende nauwkeurig te beschrijven. Omdat het hier gaat om een regionaal

model is deze lokale onnauwkeurigheid geaccepteerd, waarbij in de uitkomsten van de scenarioberekeningen rekening is gehouden (er zijn geen uitspraken gedaan over de lokale situatie rondom de Hooge Berg).

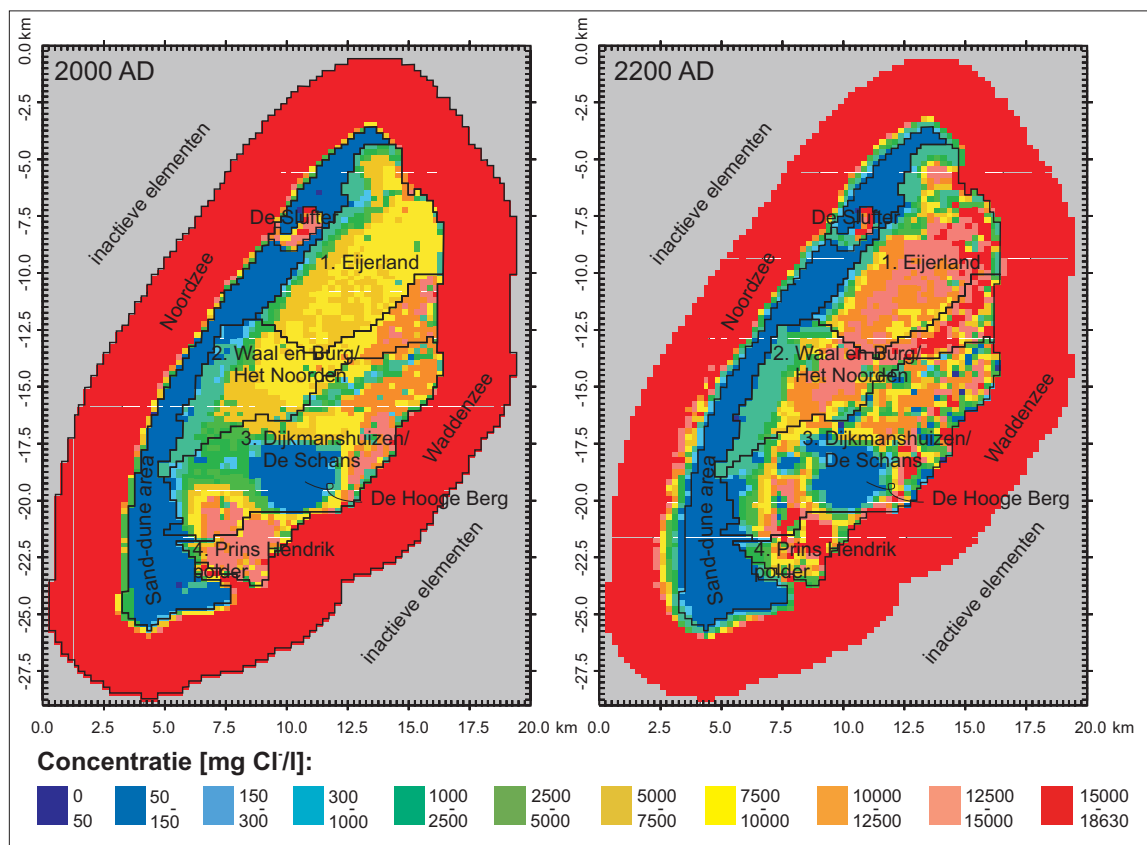
Uiteindelijk heeft de kalibratie geleid tot een model met een gemiddelde absoluut verschil tussen de gemeten en berekende zoetwaterstijghoogte (in 111 filters) van 24 cm. Zowel door de opdrachtgevers als de modelleurs werd dit (vanzelfsprekend) voor een dergelijk regionaal model als voldoende nauwkeurig geaccepteerd.

Voorbeeld van toepassing model

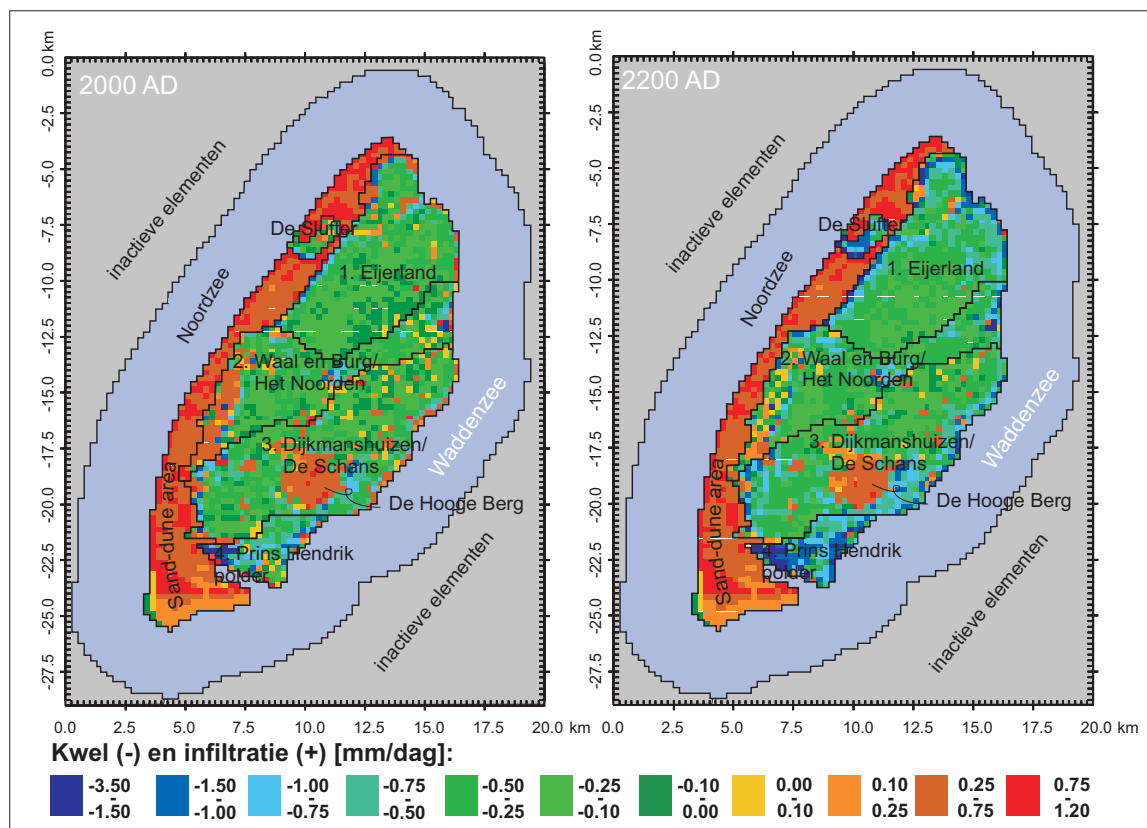
Met het gekalibreerde model zijn een aantal scenario's doorgerekend. Het effect van de scenario's op de grondwaterstanden/stijghoogten, de kwel/infiltratie, berekende gemaal-debieten en de diepte van het zoet-zout-grensvlak zijn hiermee in beeld gebracht en beschreven voor een droge zomer en een natte winter. Het gaat daarbij om de volgende scenario's:

- 1 Een relatieve zeespiegelrijzing (50 cm) en bodemdaling (25 cm);
- 2 Waterconservering door het opzetten van ontwateringspeilen in enkele polders;
- 3 Natuurontwikkeling door het opzetten van peilen in natuurgebieden;
- 4 Ingrepen in de waterketen door infiltratie van afgekoppeld hemelwater en infiltratie van RWZI-effluent;
- 5 Klimatologische verandering door verdubbeling van de winterneerslag en 20% afname van de zomerneerslag;
- 6 Combinatie van de scenario's 1, 2 en 5 (het meest waarschijnlijke scenario voor de toekomst).

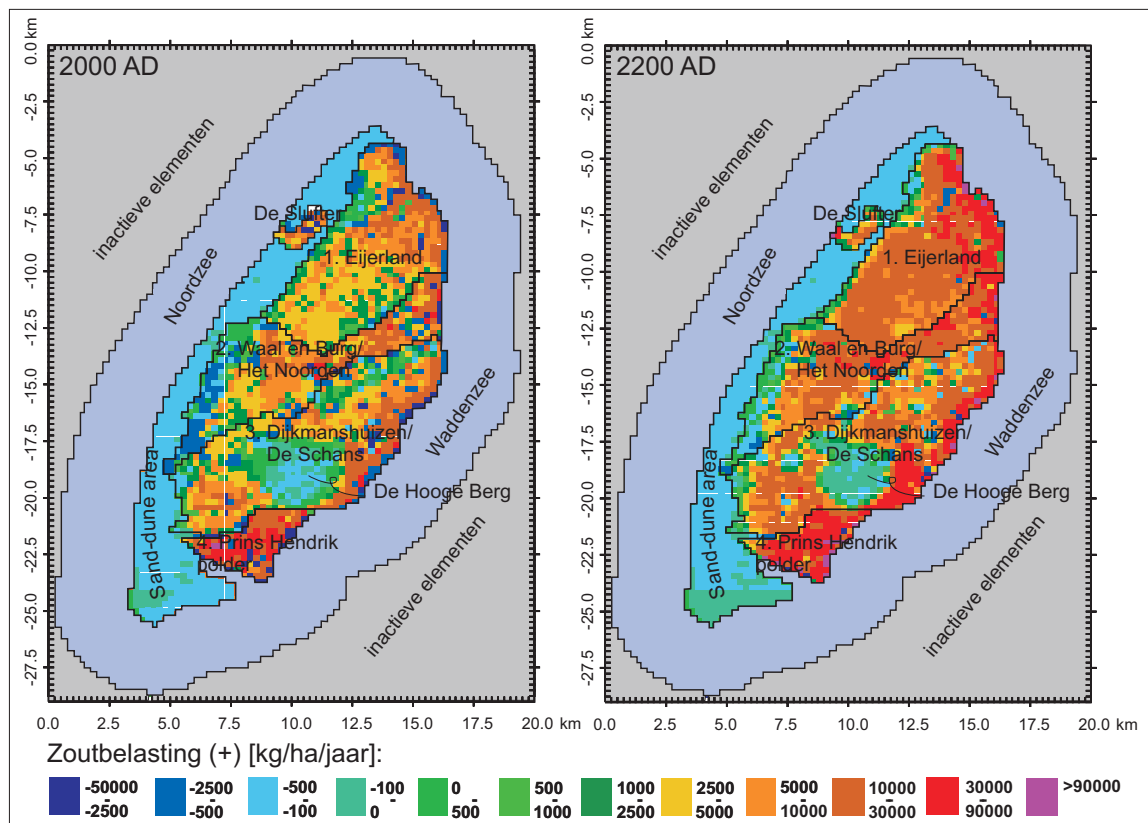
Van de bovengenoemde scenario's zijn voor scenario 1 enkele resultaten weergegeven in de figuren 5, 6 en 7. Het grondwatersysteem wordt voor 200 jaar doorgerekend, waarbij de relatieve zeespiegel 75 cm per eeuw stijgt (zeespiegelstijging en bodemdaling zijn gecombineerd). Gelet op het chloridegehalte in de bovenste laag op N.A.P. -0,75 m. (figuur 5), is te zien dat het grondwatersysteem verzilt. Het chloridegehalte in de laaggelegen polders neemt flink toe. Daaraan gelieerd nemen ook de kwel en de zoutbelasting in de polders toe (figuren 6 en 7). Het gehele laaggelegen poldergebied ondervindt de gevolgen van een zeespiegelstijging omdat de afstand tot de zee overal beperkt is, maximaal 5 km. Overigens is uit de resultaten van de modelstudie gebleken dat tot 2100 de autonome verzilting van het grondwatersysteem groter is dan het toegevoegde effect van de zeespiegelstijging.



Figuur 5: Berekende chloridegehalte in de bovenste laag op N.A.P. -0,75 m voor de jaren 2000 AD en 2200 AD. De relatieve zeespiegelstijging is 75 cm per eeuw.



Figuur 6: Berekende kwel (in mm/dag) aan de onderkant van de bovenste laag op N.A.P. -1,5 m voor de jaren 2000 AD en 2200 AD. De relatieve zeespiegelstijging is 75 cm per eeuw.



Figuur 7: Berekende zoutbelasting (in kg/ha/jaar) aan de onderkant van de bovenste laag op N.A.P. -1,5 m voor de jaren 2000 AD en 2200 AD. De relatieve zeespiegelstijging is 75 cm per eeuw.

Conclusies

In gebieden waar zoet en zout grondwater voorkomt is het essentieel om in filters waar de stijghoogte wordt gemeten ook de dichtheid van het grondwater in het filter te weten. Dit kan bijvoorbeeld door de concentratie van het chloridegehalte te meten, maar het mag ook de TDS (Total Dissolved Solids) of de elektrische geleidbaarheid zijn. Zonder deze 'kwaliteitsmetingen' van het grondwater kunnen stijghoogtemetingen niet worden gecorrigeerd voor de dichtheid, waardoor onderling vergelijk en toepassing voor dichtheidsafhankelijke grondwatermodellen niet mogelijk is.

Zelfs in het geval dat kwaliteitsmetingen worden gedaan, blijft het een lastige opgave om het gehele driedimensionale dichtheidsveld goed in te schatten. Interpolatie tussen gemeten chlorideconcentraties (en dus dichtheid) biedt nauwelijks soelaas, omdat in werkelijkheid lokaal scherpe overgangen in chlorideconcentratie (en dichtheid) kunnen voorkomen, die bij de interpolatie vervagen of zelfs helemaal kunnen verdwijnen. Niet-stationaire modelberekeningen kunnen numerieke inversies van zoet en zout grondwater herkenbaar maken, zodat deze verwijderd kunnen worden. Voor een goede inschatting van het dichtheidsveld ten behoeve van een modellering is de aanwezigheid van kennis bij de modelleur over het geohydrologisch én het hydrogeochemisch systeem onontbeerlijk.

Bij de kalibratie van het model is de grote invloed van het dichtheidsveld op de resultaten gebleken. Zelfs bij een (veronderstelde) goede inschatting van het dichtheidsveld op basis van de profielen, bleek het dichtheidsveld niet voldoende nauwkeurig ingeschat om goede modelresultaten te verkrijgen.

Om tot een zo goed mogelijke beschrijving van het zoet–zout-systeem van Texel te komen is gelijktijdig gebruik gemaakt van zowel MODFLOW + density package (om binnen PMWIN automatisch met PEST te kunnen kalibreren) als MOCDENS3D (om het initiële dichtheidsveld te verbeteren en om niet-stationair te rekenen). Deze combinatie van modelcodes voor hetzelfde gebied heeft in deze studie een grote meerwaarde gehad.

Literatuur

- Chiang, W.H. en W.K.H. Kinzelbach (2001)** 3D-Groundwater Modeling with PMWIN; Springer-Verlag, Berlin.
- Doherty, J., L. Brebber en P. Whyte (1994)** Pest – Model-independent parameter estimation. User's manual; Watermark Computing, Australia.
- Grontmij Noord-Holland (2001)** Geohydrologisch Onderzoek Wieringer-randmeer; in opdracht van het Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen.
- KIWA (2003)** Het zout der aarde: kwantificeren van de toekomstige vraag naar en beschikbaarheid van goed water voor Rijnland; onderzoeksrapport in opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland, in druk.
- McDonald, M.G. en A.W. Harbaugh (1988)** MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model; USGS-report 83-875.
- Oude Essink, G.H.P. (1998)** Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D; in: *STROMINGEN*, jrg 4, nr 1, pag 5–23.
- Oude Essink, G.H.P. (2000)** Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de kop van Noord-Holland, een toepassing van de drie-dimensionale computercode MOCDENS3D; in: *STROMINGEN*, jrg 6, nr 3, pag 9–21.
- Schaars, F.W. en M.W. van Gerven (1997)** Density package, Simulation of density driven flow in MODFLOW; KIWA-report SWS 97.511; KIWA research and consultancy, Nieuwegein.
- Stuyfzand, P.J. (1986)** Een nieuwe hydrochemische classificatie van watertypen, met Nederlandse voorbeelden van toepassing; in: *H₂O*, nr 23, pag 562–568.
- Waterschap Hollands Kroon (WSHK) en Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen (1998)** Waterbeheersplan Hollands Kroon 1997–2000.
- Witteveen + Bos (2000)** Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel; onderzoeksrapport in opdracht van Provincie Noord-Holland, Waterschap Hollands Kroon, Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen en Gemeente Texel.