

Nationaal Hydrologisch
Instrumentarium - NHI
Modelrapportage



Deelrapport Zoet-zout

Juni 2008

Nationaal Hydrologisch
Instrumentarium - NHI
Modelrapportage



Deelrapport Zoet-zout

versie : NHI\FASE_1+\2008\DR2\v1

Juni 2008

INHOUD	BLAD	
1	INLEIDING	3
1.1	Doel	3
1.2	Aanleiding	3
1.3	Resultaten	3
1.4	Leeswijzer	4
2	CORRECTIES NAAR ZOETWATERSTIJGHOOGTE MET MOC PACKAGE	5
3	WERKWIJZE 3D ZOET-ZOUT BEELD	7
4	BASISDATA	8
4.1	Chloride analyses	8
4.2	VES-metingen	8
4.3	Boorgatmetingen	8
5	VAN PUNTMETING NAAR EEN CONTINUE 3D CHLORIDE CONCENTRATIE VELD	10
6	VERGELIJKING NIEUWE ZOET-ZOUT VERDELING MET NAGROM VERDELING	14
7	BEPALING NIEUWE ZOET-ZOUT VERDELING VOOR NHI FASE 1+	19
8	DISCUSSIE CONCENTRATIEVERDELING NHI FASE 1+	21
9	PLAUSIBILITEIT EN TOEPASSINGSBEREIK	23
10	DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN	24
10.1	Discussie	24
10.2	Aanbevelingen voor NHI fase 2	24
11	REFERENTIES	26
12	COLOFON	27

1 INLEIDING

1.1 Doel

Het NHI fase 1+ instrumentarium is een kwantiteitsinstrument. Echter met betrekking tot zoutgehalten wordt een uitzondering gemaakt. In dit deelrapport, "Zoet-zout", wordt beschreven hoe in het NHI fase 1+ instrumentarium gerekend wordt met zoutconcentraties en wordt stapsgewijs uitgelegd hoe gekomen is tot de initiële zoet-zout verdeling in het Nederlandse grondwatersysteem.

1.2 Aanleiding

Het NHI fase 1+ modelinstrumentarium heeft als doelstelling dat het minimaal de kwaliteit en functionaliteit heeft van haar voorgangers. In zowel LGM als het PAWN instrumentarium was het mogelijk naast stroming ook zoutconcentraties te berekenen in de onverzadigde zone, grondwater en oppervlaktewater.

Hiervoor zijn twee zaken noodzakelijk:

- Initiële zoutconcentraties in ondergrond (3D) en oppervlaktewater;
- Berekeningsmethodieken voor verplaatsing van zout.

1.3 Resultaten

De verschillende compartimenten van het watersysteem kennen een verschillende aanpak wat betreft het rekenen met zoutconcentraties in het NHI fase 1+ instrumentarium:

Grondwater (MODFLOW):

- **Berekening:**
Er wordt gerekend met de MODFLOW MOC package (Oude Essink, 1998) om stijghoogten te corrigeren voor het zoutgehalte. Er wordt niet gerekend met zoutverplaatsing: het initiële 3D concentratiebeeld blijft gehandhaafd gedurende de gehele rekenperiode.
- **Initieel concentratiebeeld:**
Het initiële zoutconcentratiebeeld is gebaseerd op het 3D REGIS Zoet-Zout beeld van de Nederlandse ondergrond. Om de concentratie in een NHI modellaag te bepalen wordt de concentratie van het midden van de modellaag uit het 3D zoet-zout beeld genomen.

Onverzadigde zone (MetaSWAP):

- **Berekening:**
Het zoutgehalte van de onverzadigde zone is met name van belang voor het bepalen van zoutschade aan gewassen. *(Op dit moment wordt (nog) niet met zoutschade gerekend. Dit zal in de nabije toekomst wel het geval zijn.)*
- **Initieel concentratiebeeld:**
Op basis van het 3D REGIS zoet-zout beeld wordt een gemiddeld zoutgehalte van de wortelzone vastgesteld.

Oppervlaktewater (Mozart en DM):

- **Berekening:**
De inkomende en uitgaande termen van de waterbalans van de LSW's in Mozart zijn voorzien van zoutconcentraties. Na iedere tijdstap wordt de concentratie van de LSW opnieuw bepaald. In DM wordt voor een knoop een zoutvracht bepaald op basis van de balans van inkomende en uitgaande termen inclusief hun bijbehorende concentraties.

NHI

– **Initiële concentratiebeeld:**

Mozart en DM kennen per LSW dan wel knoop een initiële zoutconcentraties, gebaseerd op informatie van RIZA, waterschappen, etc. Deze concentraties zijn binnen NHI fase 1+ niet aangepast.

1.4 Leeswijzer

In deze rapportage ligt de nadruk op het grondwatercompartiment, omdat daarin ten opzichte van eerdere modellen veranderingen zijn aangebracht met betrekking tot zoet-zout. In het volgende hoofdstuk wordt kort stil gestaan bij het corrigeren van stijghoogten voor de zoutconcentratie. In de hoofdstukken 3 tot en met 8 gewijde wordt aandacht besteed aan het bepalen van de initiële 3D zoutconcentratie van de ondergrond.

Daarna volgen algemene conclusies en aanbevelingen met betrekking tot zoet-zout interacties in het gehele instrumentarium, dus niet alleen het grondwater.

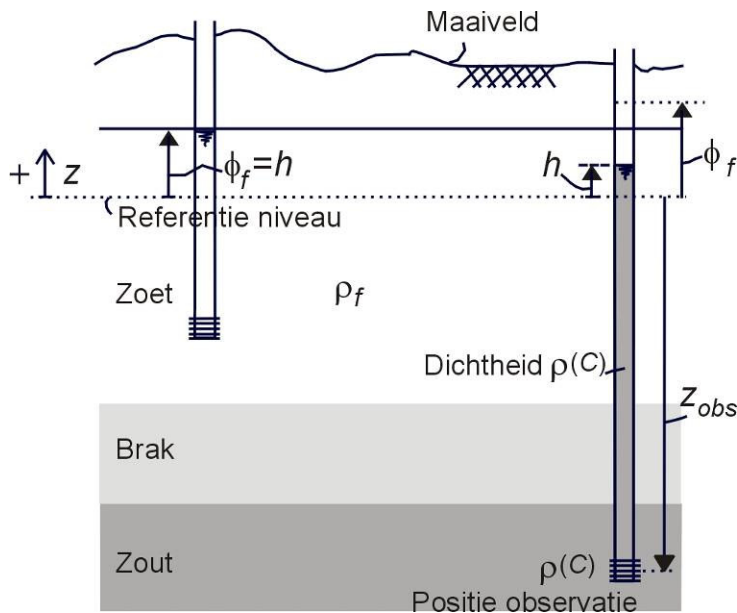
2 CORRECTIES NAAR ZOETWATERSTIJGHOOGTE MET MOC PACKAGE

De zoutconcentraties van het grondwater in (met name de kustzone van) Nederland zijn dusdanig hoog dat de verschillen in dichtheid effect hebben op de stroming van het grondwater. Terwijl onder normale omstandigheden (dwz met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met stijghoogten, moet in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles omgerekend worden naar drukken. Opgeloste stoffen in het grondwater verhogen namelijk de druk. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten gecorrigeerd voor de dichtheid. Om dit aspect mee te nemen moet de stijghoogte worden omgerekend naar een zogenaamde equivalente zoetwaterstijghoogte, zie Figuur 1:

$$\phi_f = z_{obs} + \frac{\rho(C)}{\rho_f}(h - z_{obs})$$

waarin:

- ϕ_f = de zoetwaterstijghoogte (m);
- z_{obs} = plaatshoogte observatie punt (m);
- h = de drukhoogte van de waterkolom t.o.v. het referentie niveau (m);
- $\rho(C)$ = dichtheid van het grondwater (kg/m³), ter plaatse van het observatie punt;
- C = chloride concentratie van het water (mg Cl-l);
- ρ_f = referentiedichtheid, meestal dichtheid van zoet water zonder opgeloste stoffen en bij gemiddelde bodemtemperatuur, hier gelijk aan 1000 kg/m³.



Figuur 1 Correcties naar zoetwaterstijghoogte

NHI

Er is in eerste instantie uitgegaan van een lineair verband tussen de dichtheid en de chloride-concentraties:

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

waarin:

α = $(\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ = relatieve dichtheidverschil = 0.025 (-);

ρ_s = dichtheid van zout water bij gemiddelde bodemtemperatuur (kg/m³). De dichtheid van zeewater is gelijk aan 1025 kg/m³;

C_s = referentie chloride-concentratie van het water (mg Cl-/l). De chloride concentratie van zeewater is gesteld op 18630 mg Cl-/l.

De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De noodzakelijke correcties kunnen significant zijn: een filterbuis gevuld met 20 m zout groundwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 20.5 m: een verschil van 0.5m (Santing, 1980, Oude Essink, 2001). In het kustgebied kunnen de stijghoogtecorrecties oplopen tot enkele meters. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk: zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert.

De correctie in stijghoogte voor elke modellaag is als volgt:

$$\Delta \phi_f [i, j, k] = \left(\frac{\rho(C) - \rho_f}{\rho_f} \right) \left(\frac{\Delta z[k] + \Delta z[k-1]}{2} \right)$$

waarin:

$\Delta \phi_f [i, j, k]$ = de correctie van de stijghoogte met de diepte (-);

$\Delta z[k]$ = dikte van de modellaag k (-);

Hoe dieper in het grondwatersysteem, hoe hoger de chloride concentraties, hoe groter de correcties.

In NHI fase 1+ wordt met behulp van de MOC package de correctie met bovenstaande formule uitgerekend. De MOC package kan gebruikt worden voor zoutverplaatsing, maar deze functionaliteit wordt in NHI fase 1+ niet gebruikt. De gebruikte concentratie voor correctie is de concentratie in het midden van de modellaag. In hoofdstuk 7 wordt dit verder beschreven. Het gebruiken van slechts 1 concentratie in het midden van de modellaag is een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid. Voor een goede beschrijving van de zoutconcentraties zou een meer gedetailleerde zoutverdeling of zelfs modellaagindeling nodig zijn, in een volgende NHI fase zal hieraan meer aandacht worden geschonken.

3 WERKWIJZE 3D ZOET-ZOUT BEELD

Voor de bepaling van de 3D verdeling van zoet, brak en zout grondwater is gebruik gemaakt van de uitgebreide databestanden die bij TNO in beheer zijn (DINO Qua; zoet-zout REGIS; Kloosterman, 2007).

Het betreft drie typen data:

1. Chloride analyses;
2. VES-metingen;
3. Boorgatmetingen.

Met behulp van kennis van o.a. de geologische opbouw en kennis over verziltings- en verzoetingsprocessen zijn deze metingen geïnterpoleerd tot een 3D zoet-zout beeld. Dit is niet in het kader van het NHI gedaan, maar wordt ter informatie hier wel kort beschreven (hoofdstukken 4 en 5).

Bij het bepalen van het 3D zoet-zout beeld voor NHI fase 1+ zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- Vergelijking zoet-zout verdeling REGIS met de NAGROM zoet-zout verdeling (hoofdstuk 6)
Ter controle van het nieuwe 3D zoet-zout REGIS concentratiebeeld is dit beeld vergeleken met de NAGROM zoet-zout verdeling. Deze laatste is lange tijd gebruikt en het is bekend hoe goed dit beeld op locaties is.
- Bepaling nieuwe zoet-zout verdeling voor de vier modellen van NHI fase 1+ (hoofdstuk 7)
De chloride concentratie wordt bepaald voor de modellen door in het centrum van elke modelcel van 250*250 m² (het midden tussen boven en onderkant van de modellaag in de zgn. knooppunten) de chloride concentratie te bepalen.

Deze stappen zijn wel specifiek voor NHI uitgevoerd.

4 BASISDATA

Zoet-zout REGIS is gebaseerd op drie data typen:

1. Chloride analyses;
2. VES-metingen;
3. Boorgatmetingen.

In Figuur 2 zijn als voorbeeld voor Noord en Midden Nederland de datalocaties binnen 5 m van de onderkant van de deklaag weergegeven.

4.1 Chloride analyses

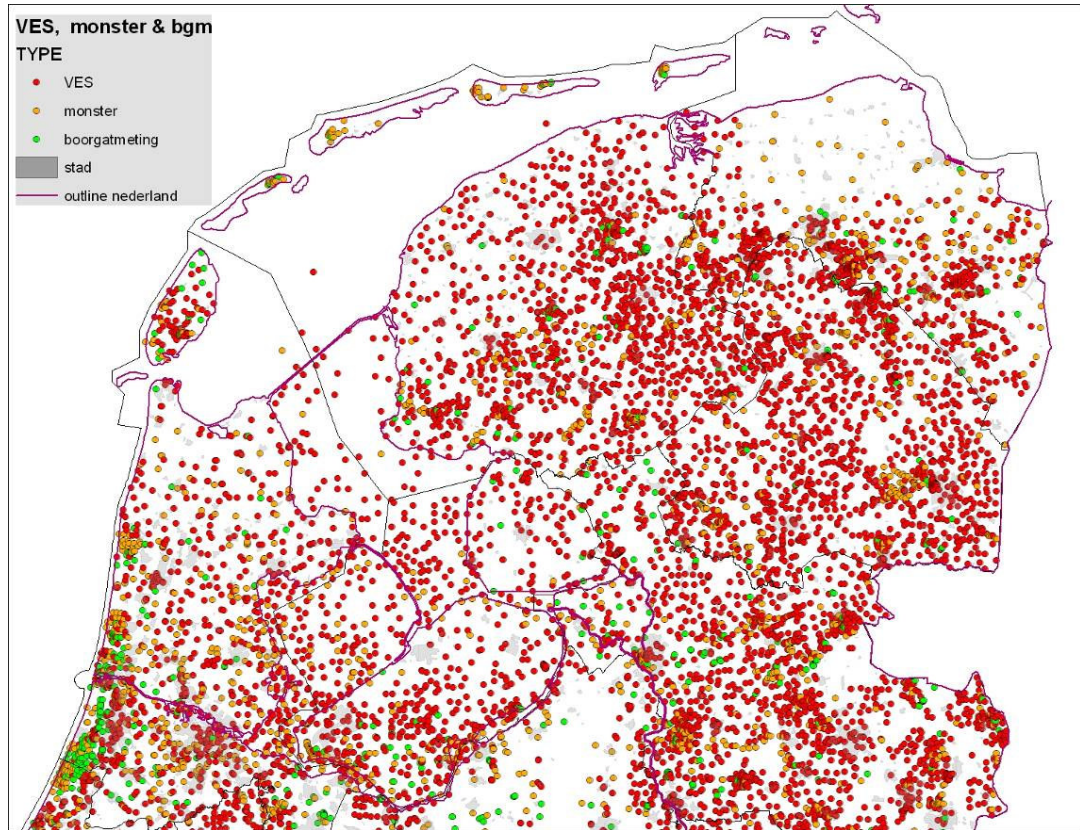
Er zijn ruim 60.000 chloride analyses in geheel Nederland, gemeten vanaf 1853. Figuur 3 geeft van al deze chloride analyses de frequentie verdeling van zowel het moment van meten als de diepte. Uit figuur 3b is af te leiden dat slechts ongeveer 10% van de metingen dieper ligt dan -70m N.A.P. Gemiddeld 30% van de metingen betreft brak of zout grondwater, terwijl juist deze waarden waardevol zijn voor de bepaling van de zoet, brak en zout verdeling in Nederland. Al met al lijkt een groot databestand beschikbaar te zijn, maar op diepte is het aantal analyses beperkt. Een voorbeeld hiervan is de toepassing van het databestand voor de Provincie Zuid-Holland (zie Minnema *et al.*, 2004).

4.2 VES-metingen

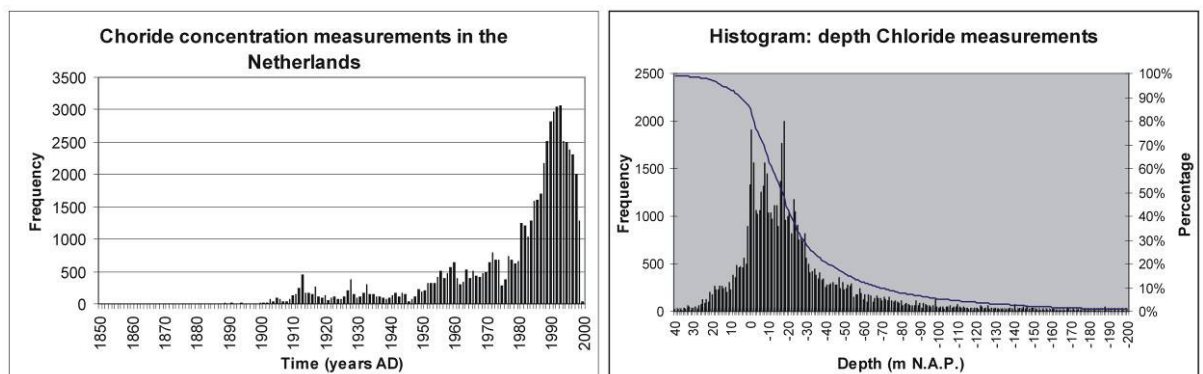
Verticale Elektrische Sonderingen zijn geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak die informatie geven over de lithologie en het zoutgehalte van grondwater. In combinatie met de temperatuur, het bicarbonaat (HCO_3)-gehalte ter plaatse en de geologische opbouw geeft een VES-meting een indicatie van het chloride-gehalte (bijvoorbeeld toegepast in Oude Essink *et al.*, 2005).

4.3 Boorgatmetingen

Bij een boorgatmeting laat men een geofysisch apparaat (sonde) in een boorgat zakken en wordt de natuurlijke gamma straling en geo-elektrische weerstand gemeten. Op basis hiervan kan een schatting worden gemaakt van de hydrogeologische opbouw. Het chloride-gehalte is geschat op basis van een empirisch bepaalde relatie tussen het bicarbonaat-gehalte (HCO_3) en de elektrische geleidbaarheid (EC 20°C) inclusief temperatuurcorrectie van de elektrische weerstand van het grondwater (TNO, 1992).



Figuur 2 Locaties van VES-metingen, chloride concentratie analyses en boorgatmetingen in midden en Noord-Nederland, allen zijn minder dan 5m verwijderd van de onderkant van de deklaag (TNO, DINO Qua; Oude Essink et al., 2005)

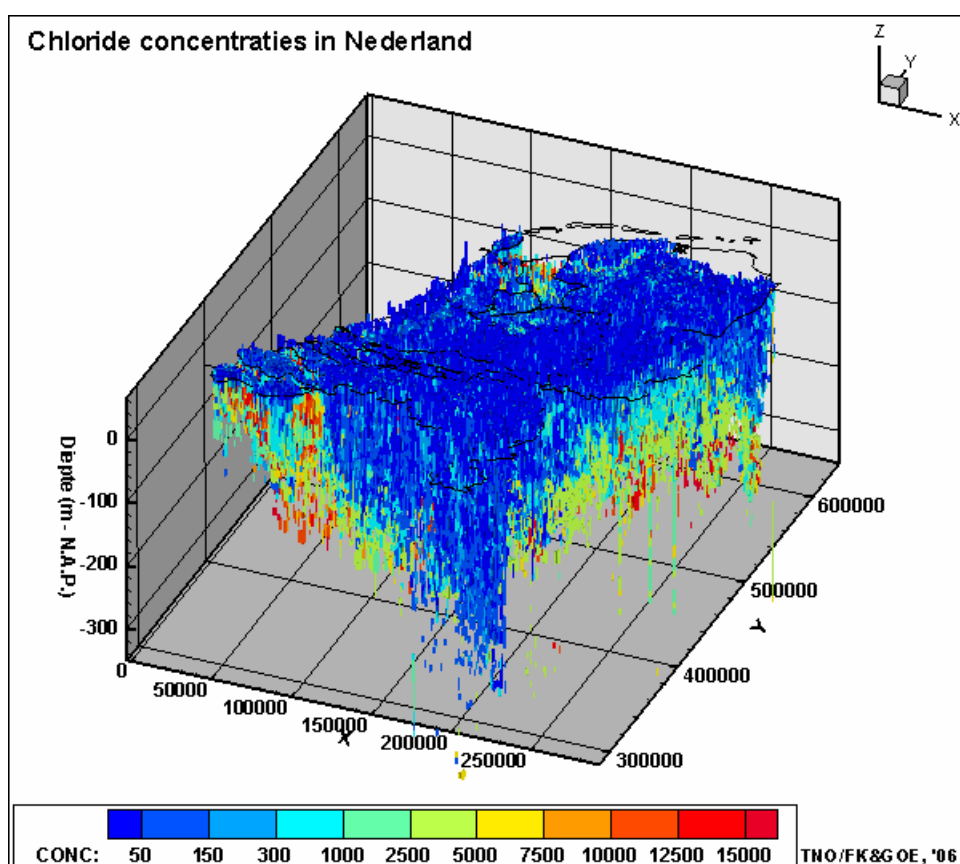


Figuur 3 Frequentie chloride analyses in Nederland versus jaar van meting (a) en diepte (b)

5 VAN PUNTMETING NAAR EEN CONTINUE 3D CHLORIDE CONCENTRATIE VELD

Binnen Zoet-Zout REGIS (Kloosterman, 2007 concept) is op basis van de metingen een 3D concentratieveld gemaakt door middel van interpolatie technieken. Dit is stapsgewijs gebeurd:

1. Omdat niet overal voldoende metingen aanwezig zijn, zijn zogenaamde dummy filters, zogenaamde fictieve chloride concentratie metingen, gecreëerd en toegevoegd aan het databestand. Bij de gebruikte methodiek is rekening gehouden met de geologische opbouw. Daarnaast is in de methodiek aan de bovenkant van het grondwatersysteem een concentratie van 20 mg Cl-/l opgegeven. Het voorlopige eindresultaat is een puntenwolk van chloride concentraties (weergegeven in Figuur 4).



Figuur 4 Positie in Nederland van alle gemeten en 'berekende' chloride concentraties (Kloosterman, 2007, concept)

2. Vervolgens is dit continue 3D veld van chloride concentraties gediscrètiseerd. Hiervoor is de volgende procedure gekozen:
 - a) Het grondwatersysteem in Nederland is opgedeeld in 83 modellagen met verschillende dikten. De bovenkant van de eerste laag ligt op +95m N.A.P. en de onderkant van de 83de laag ligt op -305m N.A.P. De bovenste 7 lagen hebben een dikte van 10m, vervolgens zijn er 6 lagen met een dikte van 5m, en daarna 50 lagen van 2m. Tenslotte zijn er 20 lagen met een dikte van 10m. De coördinaten zijn: $x_0=0$ (westen), $L_x=300000$ m en $y_0=300000$ (zuiden), $L_y=325000$ m. Zuid-Limburg en enkele Waddeneilanden zijn niet meegenomen.

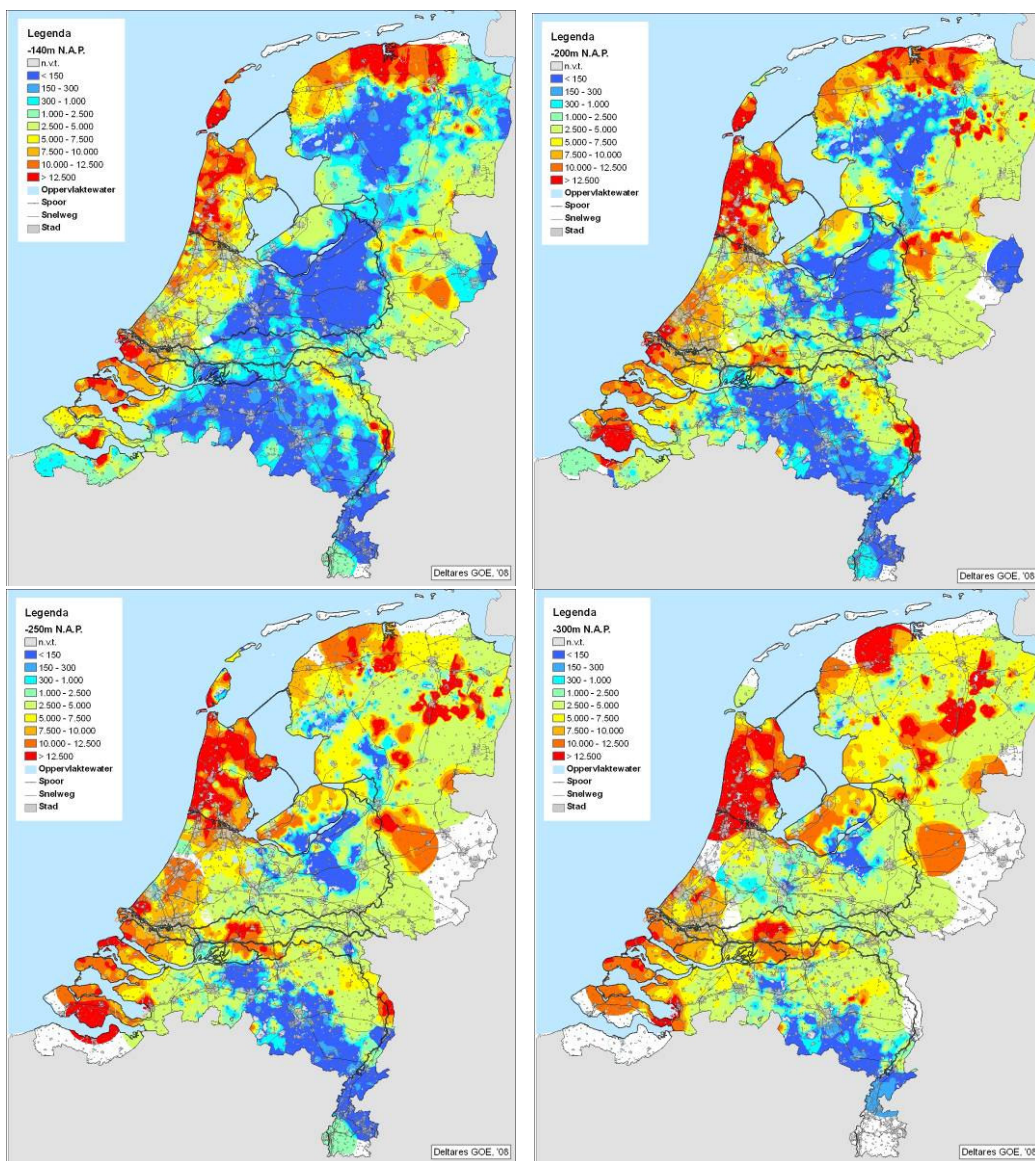
- b) Alle chloride concentratie analyses, VES en BGM metingen die zich bevinden onder de bovenkant en boven de onderkant van een desbetreffende modellaag worden gebruikt bij de interpolatie naar een continue concentratie verdeling in de desbetreffende laag. De interpolatie techniek (binnen ArcMap, Spatial Analysis) is de methode 'Inverse Distance Weigthed'. De specifieke interpolatie parameters zijn overgenomen uit de RIZA-studie (Oude Essink *et al.*, 2005). De volgende parameters zijn voor de interpolatie gebruikt:

- K-methode=ordinary (no trend);
- power=5;
- search radius type=variable;
- number of points=3;
- maximum distance=15000;
- output cell size=250.

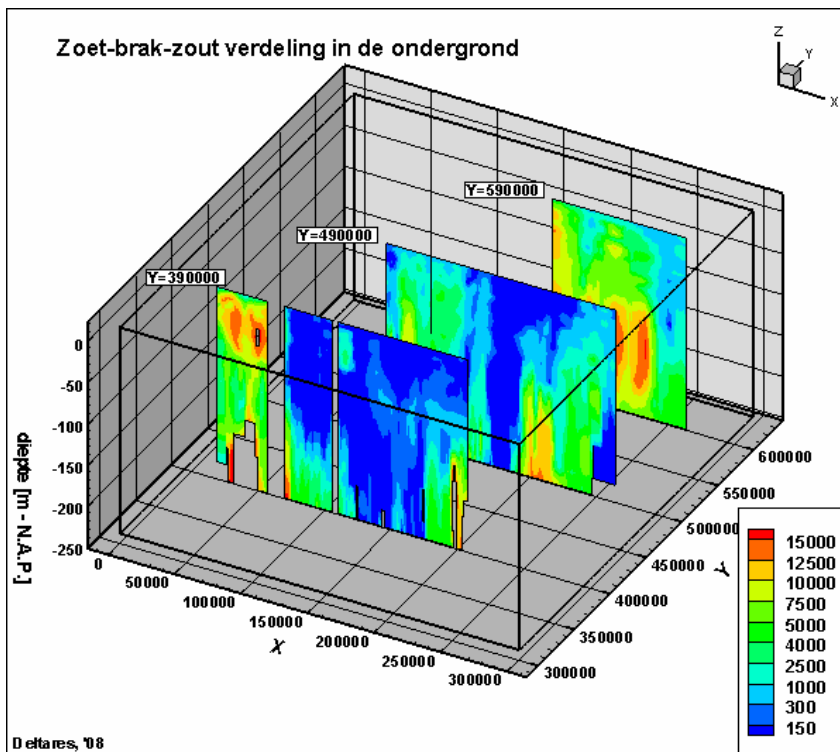
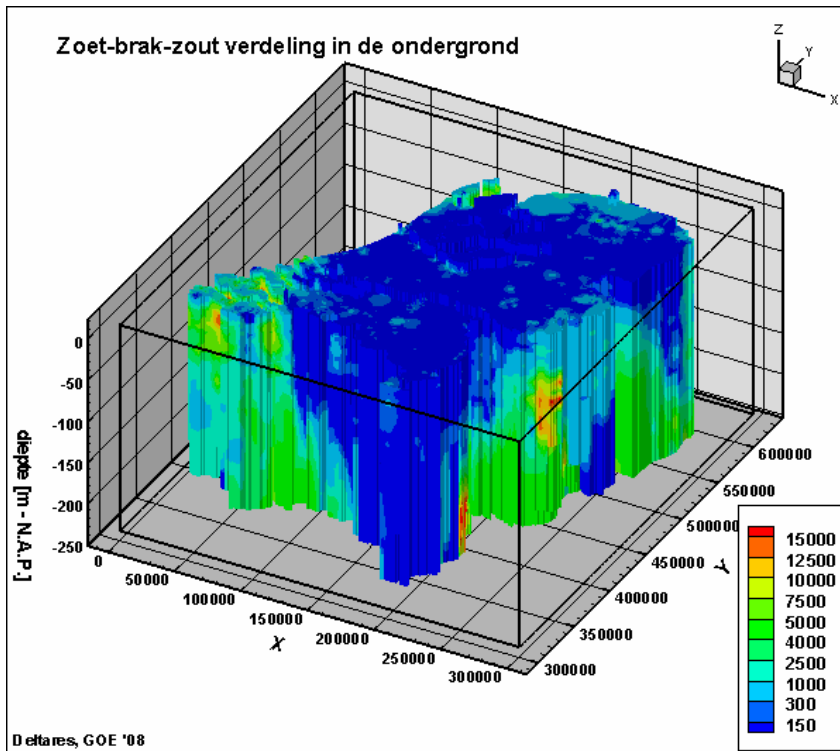
Opgemerkt moet worden dat de maximale zoekafstand van 15000m aanzienlijk is. Deze afstand is echter gekozen om (nagenoeg) alle modelcellen van een waarde te kunnen voorzien (op diepte is de afstand tussen de metingen van chloride concentraties groot). Voor deze landelijke studie zijn de gekozen waarden in deze fase van het ontwikkelen van het modelinstrumentarium op dit moment de meest praktische. De verwachting is echter dat de gekozen parameters zeer waarschijnlijk te grof zullen zijn voor bijvoorbeeld het deelgebied Zeeland, waar:

- I. relatief veel meetgegevens bekend zijn (die bij de gekozen parameters ten onrechte gemiddeld zullen worden, en
 - II. de kreekruggen waarschijnlijk alleen terug zullen komen in het continue chloride concentratie veld als een kleinere zoekafstand wordt gekozen.
- c) De 83 lagen met elk een continue chloride concentratie veld (zie Figuur 5 voor een viertal voorbeelden) zijn samengevoegd tot één 3D chloride concentratie veld (zie Figuur 6). Zo is op het eerste gezicht te zien dat de chloride concentratie met de diepte toeneemt, en dat in het kustgebied de concentraties hoger zijn. Verder zijn een flink aantal zoet-zout inversies¹ te ontdekken. Een geoefend oog kan op de plekken, waar weinig gemeten is, interpolatiecirkels (met een straal van 15000m) herkennen in het chloride concentratie veld.

1 Zoet-zout inversie: zout boven zoet grondwater. Dit is in theorie een instabiele situatie en kan normaliter alleen gedurende een geologische tijdschaal bestaan als weerstandsbiedende lagen in het gebied aanwezig zijn.



Figuur 5 Voorbeeld van een aantal doorsneden uit het 3D chloride veld

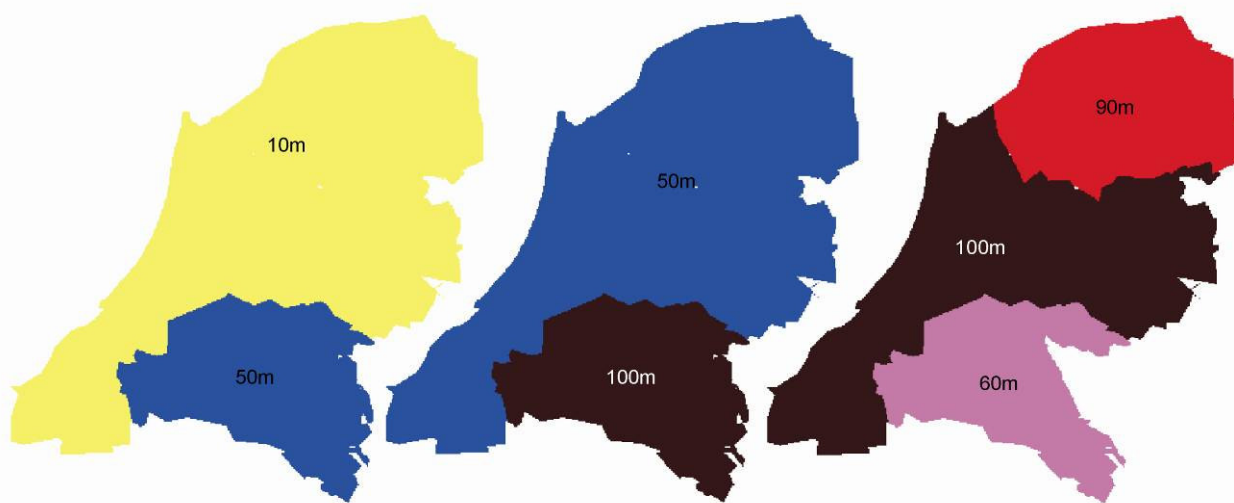


Figuur 6 Gediscretiseerde 3D verdeling (boven) en enkele profielen (onder) van zoet, brak en zout grondwater (niet alle 83 lagen zijn weergegeven vanwege geheugenproblemen bij de visualisatie)

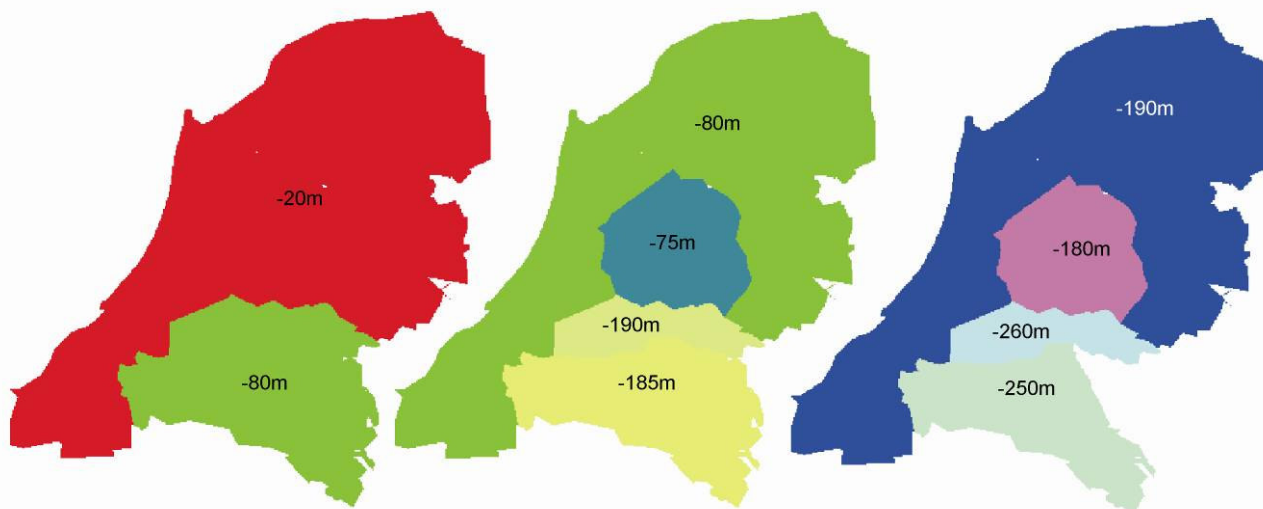
6 VERGELIJKING NIEUWE ZOET-ZOUT VERDELING MET NAGROM VERDELING

NAGROM bestaat uit een drietal modellagen, die watervoerende pakketten representeren. In Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 9 zijn achtereenvolgens weergegeven:

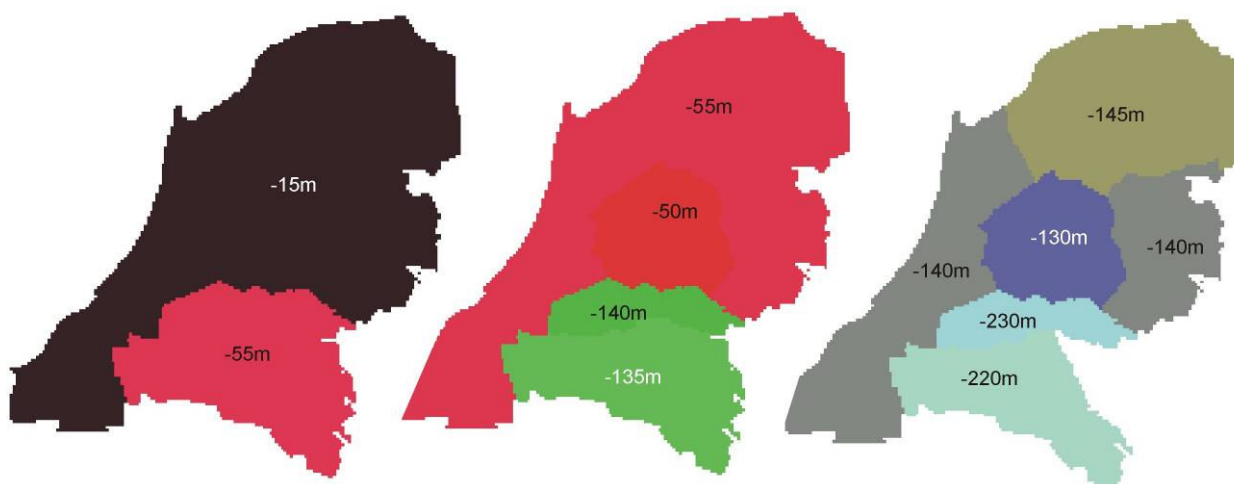
- de dikten van het watervoerend pakketten (=modellagen);
- de positie van de basis van de modellaag;
- de positie van het centrum/knooppunt van de modelcel.



Figuur 7 Dikten (m) van de drie watervoerende pakketten



Figuur 8 Positie basis (m -N.A.P.) van de drie watervoerende pakketten

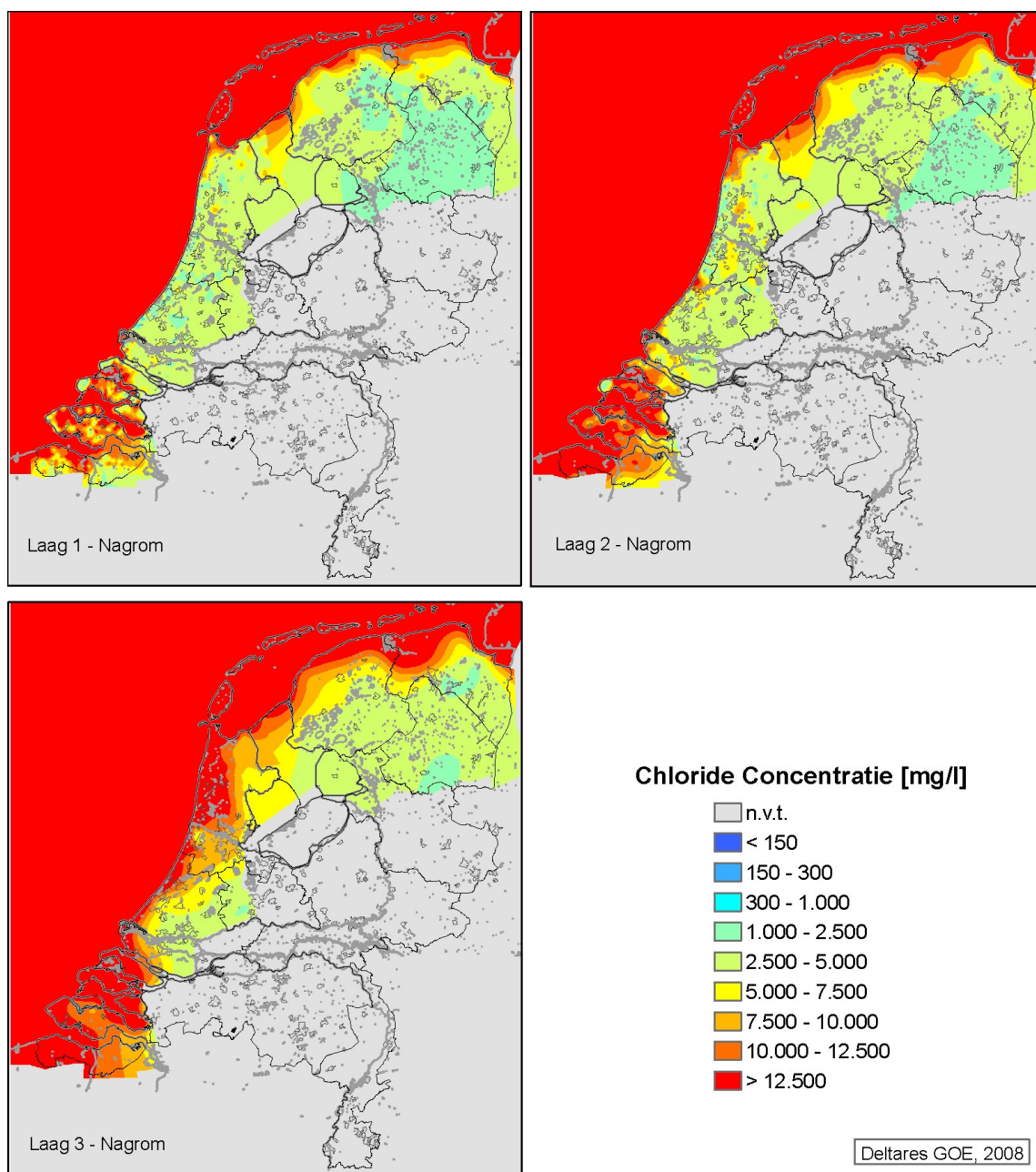


Figuur 9 Positie van de knooppunten (m onder N.A.P.) van de drie modellagen van de drie watervoerende pakketten in NAGROM

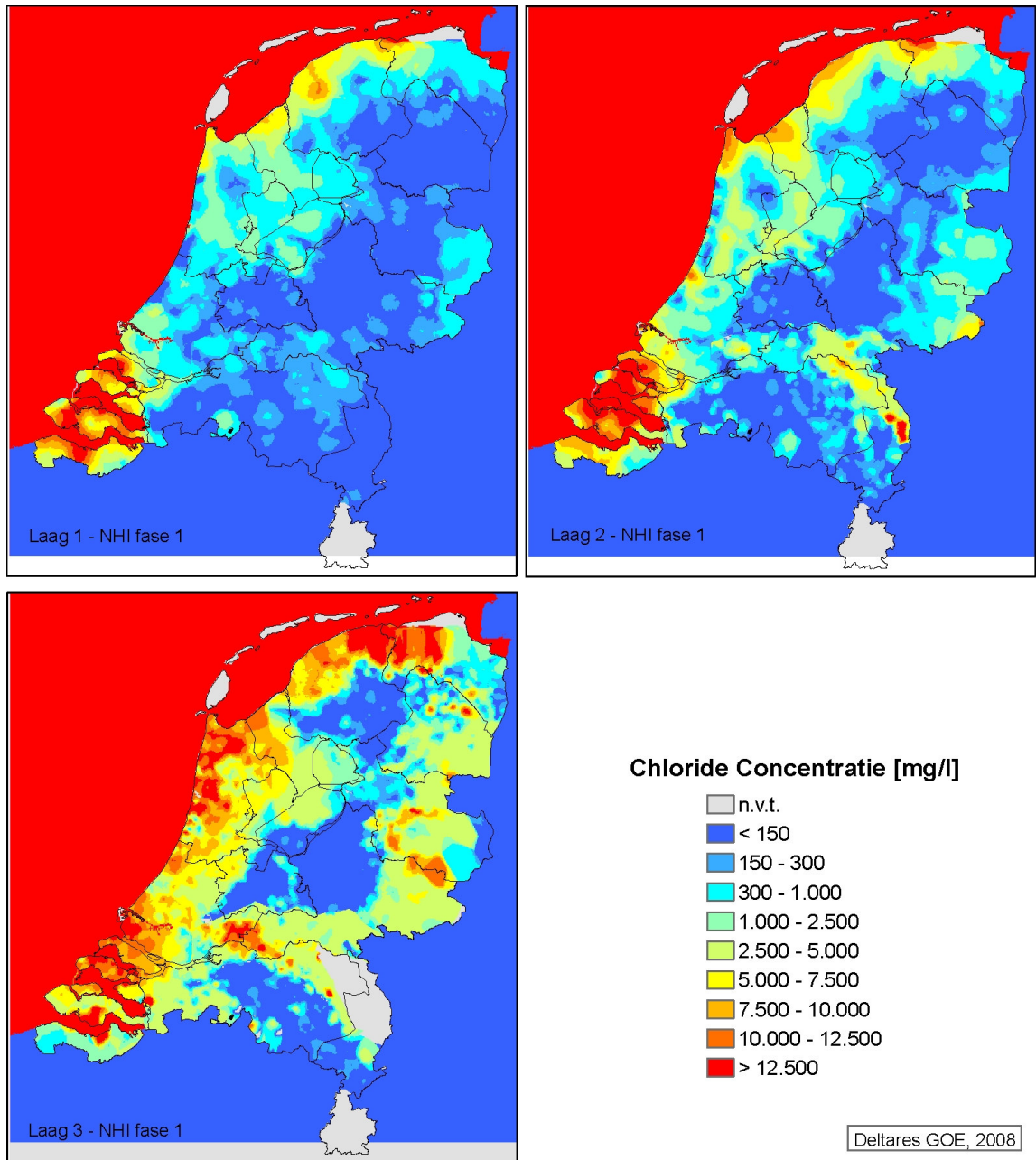
In Figuur 10 is de zoet-brak-zout verdeling is zien, zoals die in NAGROM is gebruikt. Deze resultaten zijn gecreëerd door middel het extrapoleren van analyses van chloride concentraties met de zogenaamde 'Methode van Hardy' (1971) naar een continue 3D chloride concentratie veld.

Het continue 3D chloride concentratie veld is gebruikt om op de specifieke locaties van de knooppunten de chloride concentratie te bepalen. Dit is hier gedaan door, in eerste instantie (andere benaderingen zijn mogelijk), voor elk knooppunt het gemiddelde te nemen van de twee omliggende chloride concentraties. Figuur 11 is gecreëerd met behulp van het continue 3D chloride concentratie veld (het aanmaken van dit veld is kort beschreven in hoofdstuk 5). Voor de Waddeneilanden, Noord-Groningen en Zuid-Limburg is vooralsnog geen zoet-brak-zout verdeling weergegeven in het derde watervoerend pakket, wegens;

- de aldaar beperkte hoeveelheid gegevens (zodat geen inter- en extrapolatie van puntenwaarnemingen mogelijk was), en
- de afwezigheid van de geologische opbouw ter plaatse.



Figuur 10 Zoet-brak-zout verdeling (in mg Cl-/l), zoals gebruikt in de drie modellen van NAGROM



Figuur 11 De nieuwe zoet-zout verdeling (mg Cl-/l) ter plaatse van de knooppunten van de drie modellagen zoals gebruikt in NAGROM, zie Figuur 10.

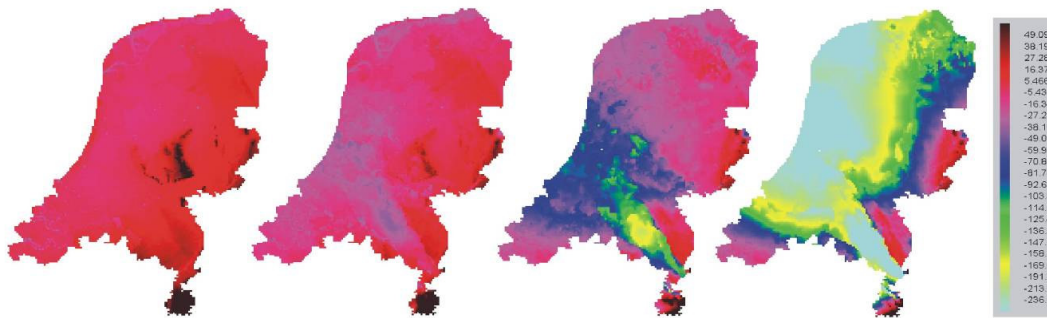
NHI

Er is een aantal verbeteringen te detecteren in de chloride verdeling zoals gebruikt in NAGROM en in het nieuwe NHI modelinstrumentarium.

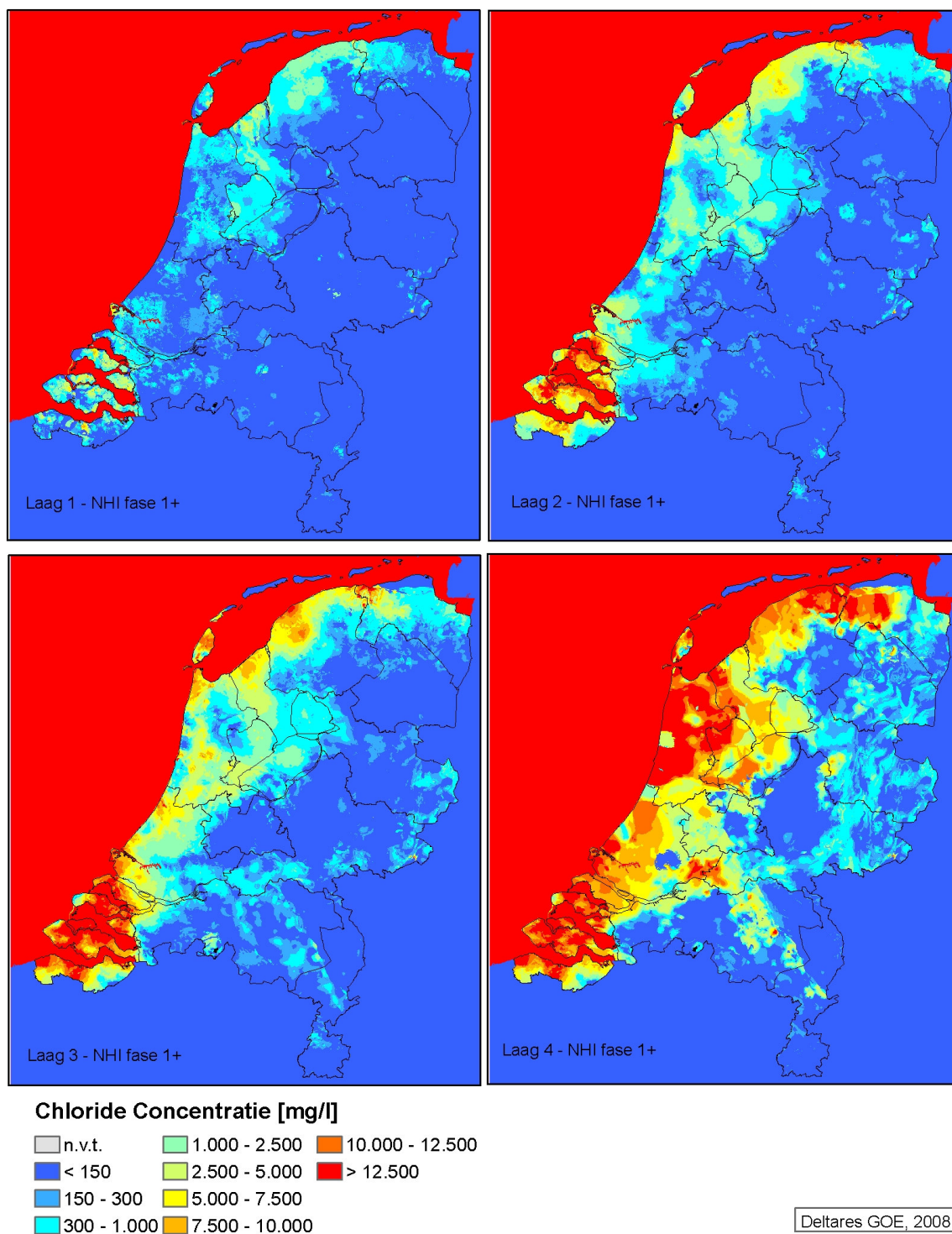
1. Chloride concentratie in het kustgebied wijken in de NAGROM schematisatie af van de NHI waarden en zijn over het algemeen iets te hoog in de NAGROM schematisatie.
 - a. Zo zijn in de specifieke duingebieden van Noord- en Zuid-Holland, waar zoet grondwater aanwezig is voor de drinkwatervoorziening in het centrum van zowel modellaag 1 (-15m N.A.P., Figuur 9) en 2 (-55m N.A.P.) de NAGROM chloride concentratie minstens honderden tot enkele duizenden mg Cl-/l te hoog;
 - b. In het overige kustgebied (op Zeeland na) lijkt de NAGROM chloride concentratie minstens honderden mg Cl-/l hoger dan de concentraties in de nieuwe methode: die meer in de lijn ligt van de gemeten chloride concentraties;
 - c. De zoetwaterlens van Hoorn is in de NAGROM verdeling in het geheel niet aanwezig in de eerste en tweede modellaag;
2. Brak en zoet grondwater in de Provincie Flevoland en ten oosten van de Biesbosch wordt in de NAGROM benadering in het geheel niet meegenomen. In de NAGROM benadering is verondersteld dat hier geen brak tot zout grondwater aanwezig is (NoData);
3. Op diepte, in de derde modellaag, neemt in werkelijkheid de chloride concentratie ook toe in het rivierengebied en in het oosten van het land (voornamelijk Twente), terwijl de NAGROM benadering dat in het geheel niet meeneemt.

7 BEPALING NIEUWE ZOET-ZOUT VERDELING VOOR NHI FASE 1+

Op dezelfde manier als in het vorige hoofdstuk is de zoet-zout verdeling bepaald voor NHI fase 1+. In dit geval dus op de diepten van de middens van de NHI modellagen (Figuur 12). In deelrapport 'Ondergrond' wordt de indeling van de ondergrond in modellagen beschreven. De bijbehorende concentraties op deze diepten zijn weergegeven in Figuur 13.



Figuur 12 Positie basis (m onder N.A.P.) van de knooppunten van de vier modellagen van de vier watervoerende pakketten zoals gebruikt in NHI fase 1+



Figuur 13 Nieuwe zoet-zout verdeling (mg Cl-/l) op de locaties van vier modellagen in NHI fase 1+

8 DISCUSSIE CONCENTRATIEVERDELING NHI FASE 1+

Het verkregen zoet-zout verdeling is nog niet de werkelijke, huidige zoet-zout verdeling in de ondergrond, maar het geeft op dit moment gegeven de bestaande databestanden een zo nauwkeurig mogelijke afspiegeling. Hierbij zijn de volgende kanttekeningen te plaatsen:

- ***Verschillende typen basisdata:***

De betrouwbaarheid van de drie typen zoet-zout databestanden varieert: chloride analyses zijn over het algemeen het meest betrouwbaar, gevolgd door de boorgatmetingen en vervolgens de VES-metingen. Verder geldt: hoe hoger het absolute chloride-gehalte, hoe betrouwbaarder de VES-meting. Het grote voordeel van VES-metingen is dat het aantal metingen een veelvoud van de chloride-analyses is (Figuur 2). Combinatie van de drie databestanden leidt tot een puntenwolk van chloride-gehalten met een behoorlijke dichtheid op regionale schaal.

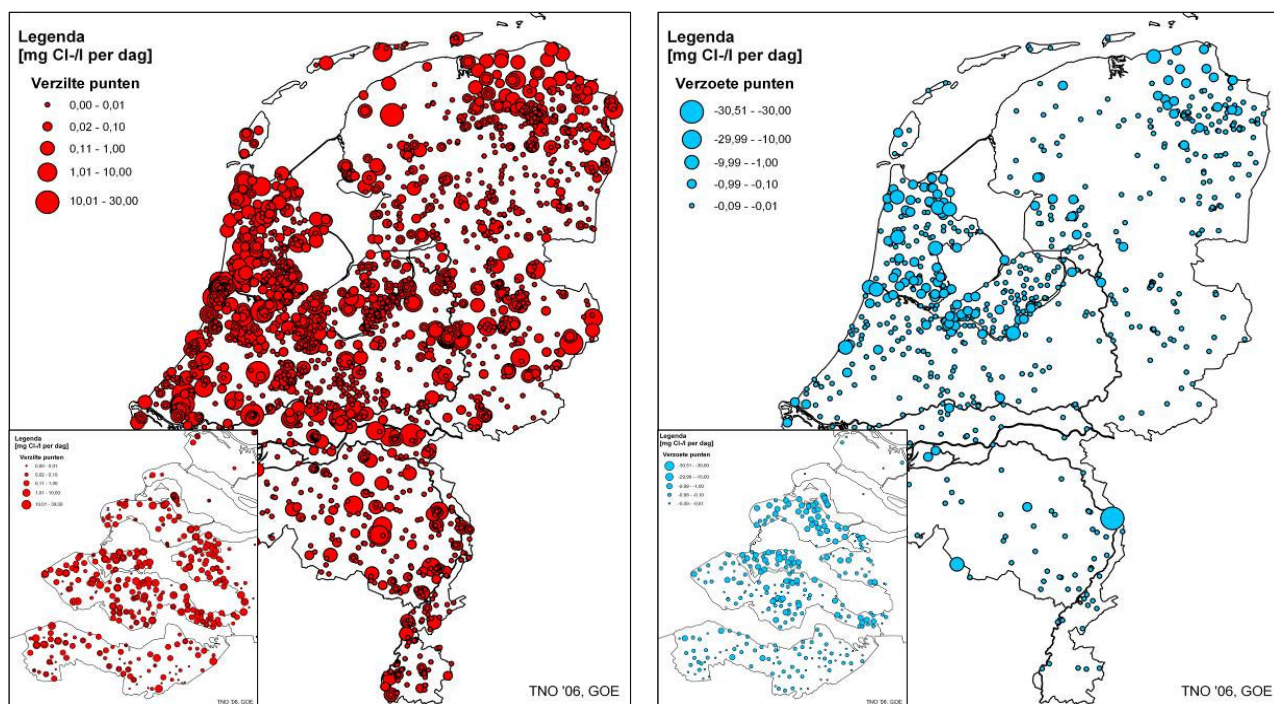
- ***Tijdstip van meting basisdata varieert:***

Zoals in Figuur 3 te zien is, varieert het tijdstip van de metingen. Weliswaar is een oude meting van bijvoorbeeld vóór 1960 beter dan geen meting, maar verziltings- en verzoetingsprocessen (Figuur 14) leiden ertoe dat er een fout wordt geïntroduceerd.

- ***Onnauwkeurige inter- en extrapolatie van de metingen:***

In werkelijkheid is het nog behoorlijk lastig om via inter- en extrapolatie van de discrete chloride waarnemingen een realistisch continu 3D chloride veld te verkrijgen waarmee een dichtheidsafhankelijk grondwatermodel rekent. Fouten in de bepaling van de dichtheid² van het grondwater door onjuiste inter- en extrapolatie worden gemakkelijk en altijd geïntroduceerd, zeker op grotere diepten waar het aantal waarnemingen over het algemeen zeer beperkt is. Zo kunnen door onjuiste inter- en extrapolatie (numerieke) inversies van zoet en zout grondwater eenvoudig ontstaan, terwijl die in werkelijkheid niet bestaan. Het vervelende is nu dat deze fouten in de dichtheid direct de grondwaterstroming beïnvloeden (omdat stofconcentraties en grondwaterstroming aan elkaar gekoppeld zijn). In eerste instantie lijkt een gegenereerd dichtheids- en chloride concentratie veld visueel misschien wel in orde, maar na analyse van voornamelijk de (numerieke) grondwatersnelheden blijken er echter vaak grote fouten in te zitten. Zulke fouten uit zich bijvoorbeeld daar waar de grondwatersnelheden in het verticaal onrealistisch sterk fluctueren, slechts enkel en alleen doordat een onjuiste dichtheid is ingevoerd in het numerieke model. Deze kunstmatige grondwaterstromingen kunnen dominant zijn en de werkelijke grondwaterstroming overtreffen.

² In het bereik van zoet en zout grondwater kan een lineair verband tussen dichtheid en chloride worden verondersteld.



Figuur 14 Overzicht van de locaties van observatiebuizen in Nederland (en de Provincie Zeeland in detail) waar de chloride concentratie minimaal twee keer is gemeten, uitgedrukt in verzilting (toename chlorideconcentratie als een functie van de tijd) als verzoeting van het grondwater. Bron: DINO Qua.

9 PLAUSIBILITEIT EN TOEPASSINGSBEREIK

Voor de chloride concentratie verdeling is gebruik gemaakt van alle chloride concentratie metingen in de Nederlandse ondergrond, ondersteund met diverse geofysische metingen (VES en Boorgatmetingen). Dit levert een beeld op dat op landelijke schaal met een resolutie van 250x250 m in de horizontaal en 4 modellagen in de vertikaal. Dit beeld is van voldoende kwaliteit om gebruikt te worden voor de correctie van stijghoogten naar zoetwaterstijghoogten (zie hoofdstuk 2) en voor de bepaling van de huidige zoutvracht naar het ondiepe systeem op regionale schaal.

Lokale fenomenen kunnen met deze resolutie (250mx250mx4lagen) niet goed in beeld worden gebracht. Voor lokale fenomenen is een meer gedetailleerde verticale modellaagindeling nodig en met name in de diepte zijn veel meer metingen nodig. Meer modellagen was voor het huidige model (NHI fase 1+) vanuit het oogpunt van vergelijking met voorgaande versies niet wenselijk (zie deelrapport 'ondergrond') en rekentechnisch in verband met geheugenproblemen niet haalbaar.

10 DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN

10.1 Discussie

Huidige 3D chloride concentratieverdeling

De chloride concentratie verdeling van NHI fase 1+ is in vergelijking met de oude chloride concentratie verdeling in NAGROM sterk verbeterd, doordat meer typen meetpunten zijn meegenomen, en een betere 3D interpolatietechniek is gebruikt (zijnde ZZREGIS).

Echter, lokale fenomenen zoals inversies ('zoet onder zout') kunnen op basis van de data niet overall even goed in beeld worden gebracht. Hiervoor zijn meer metingen nodig en een meer gedetailleerde modellaagindeling.

Correctie van stijghoogten naar zoetwaterstijghoogte

Door de grove schematisatie in vier modellagen zullen de (diepere) fluxen in de ondergrond beperkt gemodelleerd worden in het NHI fase 1+ model. Dit zal met name plaatsvinden in de gebieden waar de chloride concentratie in de ondergrond hoger is dan 3000-5000 mg Cl-/l, overwegend het directe kustgebied. Vanwege de vaak lagere zoutgehalten bovenin het grondwatersysteem (en omdat de twee bovenste modellagen relatief dun zijn, zie Figuur 12) zijn de effecten op de (ondiepere) fluxen meer beperkt. Aangezien het NHI fase 1+ op dit moment vooral gebruikt gaat worden voor analyses van het ondiepe systeem (ondersteuning STONE en GEOPEARL, ondersteuning droogte studie, etc.) is dit geen zwaarwegend probleem.

Met het NHI fase 1+ model is vooralsnog geen dichtheidstroming (oftewel de verplaatsing van zoet-brak-zout grondwater door dichtheidseffecten) meegenomen. Voor het berekenen van langjarige effecten (b.v. effecten autonome verzilting, klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling en veranderend waterpeilbeheer in het kustgebied) is de huidige correctie naar zoetwaterstijghoogte in slechts vier modellagen te beperkt en is dichtheidstroming wel noodzakelijk.

Op dit moment worden de correcties naar zoetwaterstijghoogte berekend op basis van de concentratie in het midden van het pakket. Aangezien NHI zeker in de diepte dikke tot zeer dikke pakketten kent (> 50-100 m) is de fout die gemaakt wordt door slechts één concentratiewaarde te nemen groot. Echter, de fout is kleiner dan wanneer helemaal niet gecorrigeerd wordt op chloride concentraties.

Een groot (technisch) probleem is dat doordat met name de onverzadigde zone en het topsysteem veel geheugen gebruiken, de correctie naar zoetwaterstijghoogte op dit moment vanwege geheugenproblemen niet mee kan draaien in NHI fase 1+. Alleen met een aangepast topsysteem kunnen sommen met correctie naar zoetwaterstijghoogte worden berekend. Dit hoeft geen probleem te zijn als niet tegelijkertijd met een en dezelfde run het ondiepe en het diepe systeem worden geanalyseerd.

10.2 Aanbevelingen voor NHI fase 2

- Het oplossen van het geheugenprobleem door bijvoorbeeld te gaan werken met een 64-bits compiler verdient de hoogste prioriteit in fase 2. Het kan niet zo zijn dat geheugenruimte bepalend is voor het al dan niet meenemen van correctie naar zoetwaterstijghoogte in het grondwatermodel.
- Correcties naar zoetwaterstijghoogte kunnen verbeterd worden door in de correctie niet alleen de concentratie in het midden van het pakket te nemen, maar de verdeling over het gehele pakket mee te laten tellen. Hiervoor kan weliswaar een aparte schalingstechniek worden opgebouwd, maar veel beter is te gaan rekenen met meerdere dunnere modellagen, om zodoende ook een zoutconcentratie gradiënt aan te brengen in watervoerende pakketten (zie volgende aanbeveling).

- Alleen door een meerlagen model te maken zullen lokale zoet-zout fenomenen (zoet-zout inversies) met NHI gemodelleerd kunnen worden.
- Veranderingen in het zoutgehalte worden niet meegenomen in NHI. Om langjarige effecten op het gehele grondwatersysteem goed te kunnen analyseren is dit echter noodzakelijk en dient dichtheidstroming gemodelleerd te worden. Hier moet naar gestreefd worden in fase 2.
- De initiële zoet-zout verdeling zou daarnaast verbeterd kunnen worden door gebruik te maken van een numeriek dichtheidsafhankelijk model voor grondwaterstroming en zouttransport. Het grondwaterstromingspatroon, veroorzaakt door topografische verschillen, openwater peilen en grondwateronttrekkingen zal zoet, brak en zout grondwater zodanig verplaatsen dat de zoet-zout verdeling beter in overeenstemming is met het heersende stromingspatroon.
- De zoutconcentraties in het grondwater uit de 3D zoutconcentratieverdeling worden op dit moment niet meegenomen in MOZART en MetaSWAP, terwijl ook daar met zoet-zout fluxen wordt gewerkt. Dit dient consistent gemaakt te worden, zeker in de kustgebieden.

11 REFERENTIES

Bader, E., 2005, Verziltings- en verzoetingsprocessen in Nederland, met speciale aandacht voor de Wieringermeerpolder, Bachelorafsluiting Aardwetenschappen, VU Amsterdam.

Hardy, R.L.(1971), Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, J. Geophysical Research., 76, 1905-1915.

Kloosterman, F.H., 2007, Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite. Concept TNO-rapport.

Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P., 2004, Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.

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., 2001, Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Lecture notes, Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands, 136 p.

Oude Essink, G. H. P. (1998), MOC3D adapted to simulate 3D density-dependent groundwater flow. Proc. MODFLOW'98 Conference, Golden, Colorado, USA: 291-303.

Santing, G., 1980, "Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten, (in Dutch)." H2O 13(22): 544-548.

TNO, 1992, Inleiding in geofysisch boorgatmeten, een praktische cursus voor grondwater onderzoek.

12 COLOFON

Opdrachtgever	: Deltares
Project	: Nationaal Hydrologisch Instrumentarium - NHI
Omvang rapport	: 27 pagina's
Auteur	: F. de Vries
Redactie	: Wijnand Turkensteen - DHV
Datum	: 12 juni 2008
