

**TNO-rapport**

**NITG 04-189-B**

**Bepaling toekomstige verzilting van het  
grondwater in Zuid-Holland**

Datum	September 2004
Auteur(s)	Ir. B. Minnema Drs. M.J.M. Kuijper Dr. ir. G.H.P. Oude Essink Dr. ir. C. Maas (KIWA NV)
Aantal pagina's	86, inclusief bijlagen
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Provincie Zuid-Holland Directie Groen, Water en Milieu
Projectnaam	Bepaling toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland
Projectnummer	005.53054

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

## Samenvatting

Zowel in het Grondwaterbeheersplan van de provincie Zuid-Holland (voor de periode 2001-2005) als bij de implementatie van de Europese Kaderrichtlijn Water (richtlijn 200/60/Eg van 23 oktober 2000) speelt het verziltingsproces van het grondwater een belangrijke rol. Om de effecten op de ontwikkeling van de verzilting, enerzijds van menselijk ingrijpen en anderzijds van klimaatverandering, zichtbaar te kunnen maken is een onderzoek ingesteld naar de toekomstige verzilting van het grondwater in de provincie Zuid-Holland.

De doelstelling van dit onderzoek is een regionaal beeld te construeren van de verdeling van het zoete, brakke en zoute grondwater en de snelheid van verplaatsing daarvan binnen de provincie Zuid-Holland. Het onderzoek richt zich op de verzilting van het grondwater binnen de watervoerende pakketten. Om dit regionale beeld te construeren, is een grondwatermodel gebouwd, dat naast grondwaterstroming ook de verplaatsing van chloride simuleert.

De dichtheid van het grondwater in de provincie van Zuid-Holland is niet constant, omdat de zoutconcentratie van het water varieert. De stroming van grondwater wordt zodoende beïnvloed door verschillen in de dichtheid van het grondwater. Voor de modellering van het grondwatersysteem is daarom rekening gehouden met deze dichtheidseffecten.

De ontwikkeling van het modelinstrumentarium kent drie verschillende fasen:

1. Bouw grondwaterstromingsmodel;
2. Gevoeligheidsanalyse en parameteroptimalisatie;
3. Bouw stoftransportmodel.

Het gebouwde grondwatermodel omvat een gebied van 92,5 bij 100 kilometer. Het modelnetwerk bestaat uit vierkante cellen van 250 bij 250 meter. Het model beslaat het gehele beheergebied van de Provincie Zuid-Holland inclusief delen van aangrenzende provincies. De lengte van de gesimuleerde periode is twee eeuwen.

### **Grondwaterstromingmodel**

Het grondwaterstromingsmodel is opgebouwd uit 9 lagen. De opbouw en parameterisatie van de ondergrond zijn gebaseerd op REGIS, het Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem van TNO-NITG. Er is een stationair model gebouwd. Het stationaire model is geïjkt op basis van gemiddelde waarden van de zoetwaterstijghoogte van de periode 1993 t/m 2002.

Het model is gericht op het berekenen van effecten in de watervoerende pakketten. Er is daarom geen gedetailleerd topsysteem in het model toegepast. Aan de bovenrand van het model is een vast polderpeil als randvoorwaarde opgegeven.

## Gevoeligheidsanalyse en parameteroptimalisatie

### *Representers*

Het grondwatermodel is geïkt op basis van een optimalisatie met de zogenaamde 'representers'. Representers zijn functies die de relatie tussen de ruimtelijke variatie van modelparameters en individuele metingen beschrijven (Valstar, 2001). Het voordeel van deze methode boven zonale ijking (zoals in PEST) is dat de in de stijghoogtemetingen aanwezige informatie over parameterwaarden optimaal benut wordt.

Om te kunnen rekenen met grondwater met verschillende dichtheden, zoals die voorkomen in het Nederlandse kustgebied, zijn zogenaamde equivalente zoetwaterstijghoogten nodig. Dit zijn gemeten stijghoogten, die zijn gecorrigeerd voor de dichtheid. Er is een parameteroptimalisatie uitgevoerd waarbij de modelparameterwaarden binnen redelijke grenzen zijn aangepast, zodanig dat de gemeten, naar zoetwater gecorrigeerde stijghoogten zo goed mogelijk worden nagebootst.

### *Residuen*

De mediaan van de verschillen tussen gemeten en berekende zoetwaterstijghoogten was na ijking 0.17 m. Ruimtelijke verspreiding van de residuen is weergegeven in zgn. 'ballenkaarten'.

## Stoftransportmodel

De chloridegehalten van het grondwater binnen de grenzen van de Provincie Zuid-Holland zijn dusdanig hoog dat deze significante ruimtelijke dichtheidsverschillen van het grondwater veroorzaken. Om rekening te houden met deze dichtheidsverschillen is de oorspronkelijke code MOC3D (Konikow e.a., 1996), waarin MODFLOW de grondwaterstromingscomponent verzorgt, voor dit model uitgebreid met een dichtheidscomponent. Met deze nieuwe code, MOCDENS3D, is het mogelijk verschillen in de dichtheidsverdeling mee te nemen in de berekening van de snelheidsverdeling en in de parameteroptimalisatie (Oude Essink, 1998).

Het stoftransportmodel bestaat uit 5.920.000 cellen van 250 bij 250 meter, verdeeld over 370 rijen, 400 kolommen en 40 lagen. Om de variatie in de verticaal van concentraties en dichtheid nauwkeurig mee te nemen is gekozen voor een groot aantal lagen. Als gevolg hiervan kunnen verschijnselen als zoet-zoutinversies of een overgangszones tussen zoet en zout grondwater binnen één watervoerend pakket in detail worden meegenomen.

Het transport van zout is niet-stationair gemodelleerd met behulp van deeltjes (initieel 8 per gridcel). Het model is doorgerekend vanaf heden tot en met het jaar 2200. Tijdens de simulatie veranderen de dichtheden in het grondwatersysteem, waardoor ook de zoetwaterstijghoogten veranderen. In het model zijn de zoetwaterstijghoogten voor elke tijdstap van 1 jaar in elke gridcel opnieuw berekend.

## Resultaten

De chloridegehalten zijn het hoogst in het westen van het gebied en nemen af richting het zuidoosten. Diepe polders vertonen een verhoogd chloridegehalte ten opzichte van hun omgeving. Chloridegehalten nemen meestal toe met de diepte en kunnen lokaal sterk variëren onder invloed van grote drinkwaterwinningen, zoals in het zuidoosten van het modelgebied het geval is. Vooral in diepe polders zoals de Haarlemmermeerpolder en de polders ten westen van Gouda is over de periode van 200 jaar duidelijk een trend van verzilting te zien.

### Huidige zoetwatervoorraad

De totale zoetwatervoorraad<sup>1</sup> binnen de grenzen van de provincie Zuid-Holland bedraagt bijna 27 miljard kubieke meter zoet water (tabel *i*). Het gaat hierbij om de totale hoeveelheid zoetwater in alle, in de ondergrond aanwezige, watervoerende pakketten en scheidende lagen. Hierbij is de indeling in watervoerende pakketten gehanteerd, zoals geschematiseerd door de provincie Zuid-Holland. Berekeningen zijn gebaseerd op een porositeit van 30%. De zoetwatervoorraad bevindt zich vooral in het oosten van de provincie.

Tabel *i* De zoetwatervoorraad in de provincie Zuid-Holland verdeeld over de verschillende watervoerende pakketten.

Watervoerend pakket	Zoetwatervoorraad (m <sup>3</sup> )
2	8090 · 10 <sup>6</sup>
3	1769 · 10 <sup>6</sup>
4	1854 · 10 <sup>6</sup>
5	1442 · 10 <sup>6</sup>
Deklaag en overige scheidende lagen	13822 · 10 <sup>6</sup>
<b>Totaal</b>	<b>26980 · 10<sup>6</sup></b>

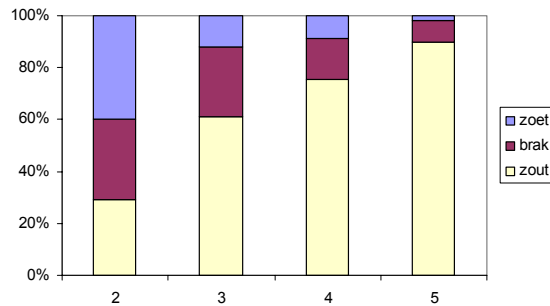
Over de gehele diepte is de samenstelling van het grondwater in de provincie Zuid-Holland als volgt:

- Zoet water: 36%
- Brak water: 14%
- Zout water: 50%.

De verhouding zoet, brak en zout grondwater verschilt per watervoerend pakket (figuur *i*).

- Watervoerend pakket 2: zoet, brak, zout water: 40, 31 en 29%;
- Watervoerend pakket 3: zoet, brak, zout water: 12, 27 en 61%;
- Watervoerend pakket 4: zoet, brak, zout water: 9, 16 en 75%;
- Watervoerend pakket 5: zoet, brak, zout water: 2, 8 en 90%.

<sup>1</sup> Voor zoet, brak en zout grondwater zijn de volgende chloridegehalten gehanteerd: **zoet**: chloridegehalte grondwater < 150 mg/l, **brak**: chloridegehalte tussen 150 mg/l en 1000 mg/l; **zout**: chloridegehalte > 1000 mg/l.



Figuur i - Verhouding zoet, brak en zout grondwater per watervoerend pakket.

#### *Snelheid van verzilting en verandering van de zoetwatervoorraad*

Om de snelheid van verzilting en verandering van de zoetwatervoorraad te bepalen, zijn drie verschillende toekomstscenario's doorgerekend:

- I. huidige onttrekkingsituatie;
- II. situatie zonder permanente zoetwateronttrekkingen (dit zijn de onttrekkingen van drinkwatermaatschappij Hydron en van Waterbedrijf Europort);
- III. situatie zonder brijnlozingen (en bijbehorende onttrekkingen).

In alle scenario's is rekening gehouden met bodemdaling en zeespiegelstijging (absolute zeespiegelstijging op de Noordzee van 0.5 cm per jaar).

In de eerste kilometers vanaf de kustlijn, in het duingebied, is de invloed van de zeespiegelstijging merkbaar; hierdoor neemt de infiltratie af. De invloed van de zeespiegelstijging dempt snel uit en is op 10 km vanaf de kust nog nauwelijks merkbaar. In het oosten van het gebied, waar de bodemdaling het sterkst is, neemt de kwelflux het meest toe (maximale toename 1.8 mm/d na 200 jaar). Over 200 jaar neemt de kwelflux in de gehele provincie Zuid-Holland gemiddeld met 22% toe. Daarnaast stijgt infiltratie naar het grondwatersysteem vanuit de boezemwaterlopen en vanuit de hoog gelegen veenweidegebieden. Hierdoor treedt enerzijds verzilting op van de diepe polders en anderzijds verzoeting van de infiltratiegebieden.

In totaal bevat het systeem een miljard ton chloride. Er bevindt zich dus momenteel al veel chloride in het systeem. Stoftransport is een traag proces. Effecten van ingrepen in het watersysteem zijn daarom niet snel zichtbaar. Op het *totale systeem* zien we daarom over een periode van 200 jaar een kleine verandering van de totale chloridebelasting (minder dan 1% verandering ten opzicht van het jaar 2000). Dit geldt eveneens voor de effecten op de totale zoetwatervoorraad.

Lokaal in het *bovenste deel* van het grondwatersysteem, daarentegen, treden wel aantoonbare veranderingen op. De toename van de zoutbelasting op het topsysteem is over een periode van 200 jaar significant. Met name de overgangen van diepe polders naar het hoger gelegen veenweidegebied of naar aangrenzende hoger gelegen boezems zijn zichtbaar.

Wanneer we kijken naar de *fluxen over de randen* van de provincie, zien we over een periode van 200 jaar een toename van de zouttoevoer over de westrand van de provincie met ruim dertig procent.

Vanwege de initieel hoge chlorideconcentraties in het systeem, is het effect van brijnlozingen en van het stopzetten van de zoetwateronttrekkingen op de chloridegehalten in het totale systeem klein (minder dan 1% verandering op de totale

water- en stofbalans). Locale veranderingen ten gevolge van het stopzetten van brijnlozingen zijn klein ten opzichte van de chloridegehalten in de omgeving. Op de locatie van de brijnlozingen treedt verzoeting op in het eerste watervoerende pakket en een lichte verzilting in het tweede watervoerend pakket. Door het stopzetten van zoetwateronttrekkingen treedt ter plaatse van de grote onttrekkingen een verzoeting op in de orde van grootte van 100mg/l.

#### *Balans*

Het grondwatersysteem is nog niet in een evenwichtssituatie beland. Ook over 200 jaar heeft het grondwatersysteem nog geen dynamische evenwichtssituatie bereikt. Dit is enerzijds te zien aan de toenemende verzilting van de diepe polders en anderzijds aan verzoeting van de aangrenzende hoger gelegen gebieden.

Er zijn chloridebalansen opgesteld voor de drie onttrekkingssituaties op basis van fluxen over de modelranden.

#### **Aanbevelingen**

Op basis van de hierboven beschreven resultaten kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

De betrouwbaarheid van de initiële dichtheidsverdeling is sterk afhankelijk van het aantal en de ruimtelijke verdeling van chloridemetingen. Onderin het grondwatersysteem zijn relatief weinig bruikbare metingen aanwezig, terwijl juist hier vaak brak en zout grondwater voorkomt. Het verdient aanbeveling het aantal chloridemetingen op grotere diepten te vergroten. Er kan dan een nauwkeurigere dichtheidsverdeling worden verkregen, op basis waarvan het stoftransportmodel kan worden verbeterd.

Omdat het zoutgehalte van sloten en plassen in belangrijke mate bepalend is voor de functies die aan deze wateren toegekend kunnen worden, is het noodzakelijk om in een eventueel vervolgonderzoek op een kleinere tijdschaal te modelleren. Om maatregelen te kunnen formuleren om de verzilting te beheersen, is het van belang om het proces, dat voor deze snelle dynamiek verantwoordelijk is, mee te nemen. In dat geval is het daarom aan te bevelen de vaste bovenrandvoorwaarde uit het huidige model te vervangen door een gedetailleerde topsysteemschematisatie.

Hoewel de verzilting en eventueel de verzoeting van het diepere grondwater traag verlopen, blijkt de uitstroming van zout naar het oppervlakkige waterhuishoudkundige systeem een uiterst dynamisch proces te zijn. Om aan te kunnen geven in hoeverre ongewenste verziltingseffecten verminderd of vermeden kunnen worden wordt daarom aanbevolen de gevolgen van verzilting op maaiveldniveau in beeld te brengen. Daartoe dient het topsysteem gekoppeld te worden aan een oppervlaktewatermodel. Op deze wijze kunnen zoutfluxen van en naar waterlopen op gedetailleerde manier worden geanalyseerd.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>11</b>
1.1	Achtergrond.....	11
1.2	Probleemstelling.....	11
1.3	Doelstelling.....	11
1.4	Aanpak.....	12
1.5	Leeswijzer.....	13
<b>2</b>	<b>Beschrijving van het onderzoeksgebied.....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>Opzet van het grondwaterstromingsmodel.....</b>	<b>15</b>
3.1	Inleiding.....	15
3.2	Horizontale modelschematisatie.....	15
3.3	Verticale modelschematisatie.....	15
3.4	Stationaire gegevensperiode, rand- en beginvoorwaarden.....	16
3.4.1	Gegevensperiode.....	16
3.4.2	Beginvoorwaarden.....	16
3.4.3	Randvoorwaarden.....	18
3.5	Parametrisatie.....	19
3.5.1	Netto grondwateraanvulling.....	19
3.5.2	Onttrekkingen.....	19
3.5.3	kD- en c-waarden en REGIS.....	19
<b>4</b>	<b>Gevoeligheidsanalyse en parameteroptimalisatie.....</b>	<b>25</b>
4.1	Bouw van het uitgangsmodel.....	25
4.1.1	Opbouw meetset.....	25
4.2	Gevoeligheidsanalyse.....	26
4.2.1	Correlatie tussen parameters.....	30
4.2.2	Meetnetgevoeligheid.....	30
4.3	Speurtocht naar conceptfouten.....	30
4.4	Parameteroptimalisatie.....	31
4.4.1	Representers.....	31
4.4.2	Concurrentie tussen twee soorten metingen.....	32
4.5	Resultaten.....	33
4.5.1	Residuen.....	33
4.5.2	kD- en c-waarden.....	33
4.5.3	Berekende zoetwaterstijghoogten.....	37
4.5.4	Berekende fluxen.....	37
<b>5</b>	<b>Opbouw stoftransportmodel.....</b>	<b>40</b>
5.1	Inleiding.....	40
5.2	Horizontale modelschematisatie.....	40
5.3	Verticale modelschematisatie.....	40
5.4	Gegevensperiode.....	41
5.5	Parametrisatie.....	41
5.5.1	Zij- en bovenrandvoorwaarden.....	41
5.5.2	Initiële dichtheidsverdeling.....	42
5.5.3	Onttrekkingen en brijnlozingen.....	42
5.6	Resultaten huidige situatie.....	43
5.6.1	Huidige zoetwatervoorraad.....	43

5.6.2	Betrouwbaarheid resultaten .....	44
<b>6</b>	<b>Scenarioberekeningen .....</b>	<b>46</b>
6.1	Scenario's .....	46
6.2	Invloedssfeer .....	47
6.3	Resultaten .....	49
6.3.1	Chloride concentraties .....	49
6.3.2	Effect permanente zoetwateronttrekkingen en brijnlozingen .....	52
6.3.3	Effect op de kwelflux .....	52
6.3.4	Effect op de zoutbelasting .....	53
6.3.5	Chlorideconcentratie in dwarsprofielen .....	53
6.3.6	Samenstelling grondwater .....	58
6.3.7	Grondwaterflux over de randen van de provincie Zuid-Holland .....	60
6.3.8	Chlorideflux over de randen van de provincie Zuid-Holland .....	62
6.3.9	Betrouwbaarheid resultaten .....	62
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>69</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
	A Invulling polderpeilen	
	B Residuen stromingsmodel	
	C Brijnlozingen	



## Lijst van tabellen en figuren

### Tabellen

Tabel 1	Verticale modelschematisatie in 9 modellagen .....	16
Tabel 2	Gehanteerde horizontale k-waarden en verticale weerstanden per modellaag voor de berekening van de initiële kD- en c-waarden. ....	21
Tabel 3	Correlatiematrix tussen de modelparameters [-]. .....	30
Tabel 4	Geohydrologische indeling, zoals gehanteerd door de provincie Zuid-Holland .....	43
Tabel 5	Huidige zoetwatervoorraad (chloridegehalte < 150 mg/l) binnen de provincie Zuid-Holland, per watervoerend pakket bij een porositeit van 30%. ....	44
Tabel 6	De zoetwatervoorraad in de provincie Zuid-Holland verdeeld over de verschillende watervoerende pakketten.....	66

### Figuren

Figuur 1	- Ligging van het onderzoeksgebied .....	14
Figuur 2	- Histogram aantal metingen (links) en percentage metingen (rechts) als een functie van het jaartal van meting. ....	17
Figuur 3	- a. Diepteligging van de meting als een functie van het jaartal van meting en b. aantal metingen per diepte en percentage van het totaal als een functie van de diepte. Op grotere diepten zijn weinig metingen beschikbaar (slechts 10% van de metingen ligt dieper dan -100 m N.A.P.), waardoor de initiële dichtheidsverdeling daar ter plaatse onnauwkeuriger is.....	18
Figuur 4	- Gidslagen in noord-zuid en west-oost profiel. ....	20
Figuur 5	- Zandbanen in de ondergrond van Zuid-Holland zorgen lokaal voor een afname van de deklaagweerstand. ....	22
Figuur 6	- Initiële kD-waarden. ....	23
Figuur 7	- Initiële c-waarden.....	24
Figuur 8	- Modelgevoeligheid voor verandering van de kD-waarden: in kolom 1 als gevolg van een fractionele verhoging van de kD in modellaag 1, in kolom 2 van de kD in modellaag 2, enzovoort. Daaronder is steeds voor elke modellaag de verandering in de zoetwaterstijghoogte als gevolg van deze verandering afgebeeld. De kleur rood resp. blauw geven aan dat de zoetwaterstijghoogte omhoog resp. omlaag gaat als de kD wordt verhoogd.....	28
Figuur 9	- Modelgevoeligheid voor verandering van de verticale doorlatendheid $k_v$ tussen twee modellagen, in kolom 1 als gevolg van een fractionele verhoging van de $k_v$ tussen modellagen 1 en 2, in kolom 2 van de $k_v$ tussen de modellagen 2 en 3, enzovoort. Daaronder is steeds voor elke modellaag de verandering in de zoetwaterstijghoogte als gevolg van de veranderde parameterwaarde afgebeeld. De kleur rood resp. blauw geven aan dat de zoetwaterstijghoogte omhoog resp. omlaag gaat als de $k_v$ wordt verhoogd.....	29
Figuur 10	- Concurrentie tussen een kD-meting en een meting van een grondwaterstand .....	32

Figuur 11 – Histogram van de residuen na parameter optimalisatie ( de rode stippellijn geeft de mediaan weer).....	33
Figuur 12 – Geoptimaliseerde kD-waarden.....	35
Figuur 13 – Geoptimaliseerde c-waarden.....	36
Figuur 14 – Berekende zoetwaterstijghoogten [ m N.A.P.] per modellaag.....	38
Figuur 15 – Berekende fluxen [mm/dag] van en naar het top-systeem: rood = infiltratie, blauw = kwel.....	39
Figuur 16 – Huidige zoetwatervoorraad per watervoerend pakket [x 1000 m <sup>3</sup> per 250x250 m].....	45
Figuur 17 – Locaties van de brijnlozingen en de permanente zoetwateronttrekkingen van drinkwatermaatschappij Hydron en van waterbedrijf Europoort.....	47
Figuur 18 – Gehanteerde bodemdalingprognose [m] in 2100 t.o.v. 2000 (bron: RIZA).....	48
Figuur 19 - Invloedssfeer van een zeespiegelstijging en bodemdaling: verschil stijghoogte [m] tussen 2000 en 2100 op een diepte van -12.5 m N.A.P..	48
Figuur 20 – Chlorideconcentratie [mg/l] op drie dieptes: huidige onttrekkingssituatie (onttrekkingssituatie I).....	50
Figuur 21 – Verandering chlorideconcentratie [mg/l] huidige onttrekkingssituatie ten opzichte van het jaar 2000 voor drie tijdstappen.....	51
Figuur 22 - Chlorideconcentratie in onttrekkingssituatie I en de verschillen na 200 jaar met de situatie zonder permanente zoetwateronttrekkingen (situatie II) en de situatie zonder brijnlozingen (situatie III). Blauw/groen = verzoeting, geel/oranje/rood = verzilting.....	54
Figuur 23 - Kwelflux aan onderkant topsysteem voor 2000 bij onttrekkingssituatie I en de veranderingen ten opzichte van 2000 voor de jaren 2050, 2100 en 2200 [mm/dag].....	55
Figuur 24 – Zoutbelasting op het topsysteem [kg/ha/jr] voor de jaren 2000, 2050, 2100 en 2200 voor de huidige onttrekkingssituatie (onttrekkingssituatie I).Figuur 25 – Chlorideconcentratie [mg/l] in drie west-oost profielen voor de jaren 2000, 2050, 2100 en 2200, voor de huidige onttrekkingssituatie (onttrekkingssituatie I). Posities van de profielen zijn aangegeven in de figuur rechtsonder.....	56
Figuur 25 – Chlorideconcentratie [mg/l] in drie west-oost profielen voor de jaren 2000, 2050, 2100 en 2200, voor de huidige onttrekkingssituatie (onttrekkingssituatie I). Posities van de profielen zijn aangegeven in de figuur rechtsonder.....	57
Figuur 26 – Percentage zoet, brak en zout grondwater per watervoerend pakket.....	58
Figuur 27 – Zoutbelasting (in ton Cl <sup>-</sup> / jaar) op -12.5 m N.A.P. in de provincie Zuid-Holland voor de huidige onttrekkingssituatie (onttrekkingssituatie I).....	59
Figuur 28 – Verloop van de hoeveelheid zoet, brak en zout grondwater voor de huidige onttrekkingssituatie over een periode van 200 jaar in de bovenste 25 meter.....	59
Figuur 29 – Horizontale grondwaterflux [10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> / jaar] over de randen van de provincie Zuid-Holland in het jaar 2000.....	61
Figuur 30 – Inkomende horizontale grondwaterflux over de grenzen van de provincie als functie van de tijd.....	61
Figuur 31 – Totale chloridebalans over de modelranden [ ton cl <sup>-</sup> /jaar] voor de huidige onttrekkingssituatie (onttrekkingssituatie I).....	63
Figuur 32 - Totale chloridebalans over de modelranden [ ton cl <sup>-</sup> /jaar] voor de situatie zonder permanente zoetwateronttrekkingen (onttrekkingssituatie II).....	64
Figuur 33 - Totale chloridebalans over de modelranden [ ton cl <sup>-</sup> /jaar] voor de situatie zonder brijnlozingen (onttrekkingssituatie III).....	65

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Verzilting van het grondwater speelt bij het grondwaterbeheer van de provincie Zuid-Holland een belangrijke rol. In het provinciaal rapport 'Bruisend Water' (Provincie Zuid-Holland, 1998) staat aangegeven dat de verzilting in de provincie langzaam maar zeker zal toenemen, vooral in de diepe polders en de Zuid-Hollandse eilanden. Het Grondwaterbeheersplan van de provincie (voor de periode 2001-2005) speelt hierop in: één van de uitgangspunten van dit plan is dat het verziltingsproces van het grondwater zoveel mogelijk vertraagd moet worden. Om dit belangrijke aspect in het volgende Grondwaterbeheersplan verder uit te werken acht de provincie het essentieel dat een onderzoek naar de toekomstige verzilting van het grondwater wordt uitgevoerd.

In de Europese Kaderrichtlijn Water (richtlijn 200/60/Eg van 23 oktober 2000) is voorgeschreven dat grondwaterlichamen beschreven moeten worden. Vervolgens zullen veranderingen van hetzij autonome ontwikkelingen of effecten door menselijk ingrijpen zichtbaar gemaakt moeten worden. Ook effecten van klimaatverandering en de ontwikkeling van de verzilting zullen hiervoor in beeld gebracht dienen te worden. Als grondwaterbeheerder heeft de provincie hierin een belangrijke taak.

## 1.2 Probleemstelling

Het grondwater in de provincie Zuid-Holland verzilt in toenemende mate. De oorzaken hiervan zijn bekend:

- de 'erfenis' van het droogleggen van diepe polders sinds de middeleeuwen. Het grondwatersysteem is nog niet 'bekomen' van deze ingrepen en daarom neemt de zoetwatervoorraad in Zuid-Holland nog steeds af;
- zeespiegelstijging ten gevolge van de klimaatveranderingen;
- bodemdaling.

Op dit moment is slechts zeer globaal bekend met welke snelheid het grondwater verzilt en waar uiteindelijk nog zoet grondwater overblijft; een provinciedekkend beeld van de verziltingsverdeling over Zuid-Holland is niet beschikbaar. De beschikbaarheid van een dergelijk beeld is echter van belang voor het grondwater-, bodem- en natuurbeheer in de (nabije) toekomst. Om een dergelijk beeld te kunnen construeren kan gesteld worden dat:

1. meer kennis nodig is over de snelheid en regionale verdeling van verzilting van het grondwater in de watervoerende pakketten;
2. in beeld moet worden gebracht wat de gevolgen zijn van (toekomstige) verzilting op maaiveldniveau en in hoeverre ongewenste verziltingseffecten verminderd of vermeden kunnen worden.

## 1.3 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is een regionaal beeld te construeren van de verdeling van het zoete, brakke en zoute grondwater en de snelheid van verplaatsing

daarvan binnen de provincie Zuid-Holland. Het onderzoek richt zich op de verzilting van het grondwater binnen de watervoerende pakketten. De verdeling van de verzilting binnen de deklaag behoort tot onderzoek van een eventueel vervolg (zie “*Probleemstelling*”, punt 2).

De doelstelling van dit onderzoek bestaat derhalve uit de beantwoording van de volgende vragen:

1. Hoeveel zoet<sup>2</sup> grondwater is er aanwezig in Zuid-Holland? Hierbij is een uitsplitsing naar het eerste, tweede en derde watervoerend pakket wenselijk, waarbij ook wordt aangegeven wat het percentage zoet grondwater is (ten opzichte van zout grondwater);
2. Met welke snelheid verzilt<sup>3</sup> het grondwater in Zuid-Holland. Hierbij worden de ruimtelijke verschillen in verziltingssnelheid in beeld gebracht. De berekeningen zijn uitgevoerd voor drie onttrekkingssituaties:
  - I. huidige situatie = situatie met alle geregistreerde (bij de provincie) permanente grondwateronttrekkingen en lozingen (geschat);
  - II. situatie zonder de permanente grondwateronttrekkingen in zoetwater (Hydron en WBE (Waterleidingbedrijf Europort));
  - III. situatie met alle geregistreerde (bij de provincie) permanente grondwateronttrekkingen exclusief de brijnlozingen (inclusief bijbehorende onttrekkingen) in de glastuinbouw en boomteeltsector;
 Bovenstaande situaties dienen te worden doorgerekend met bodemdaling en zeespiegelstijging voor de jaren 2050, 2100 en 2200;
3. Met welke snelheid neemt de omvang van de voorraad zoet grondwater af/toe, uitgaande van de drie situaties bij punt 2. Waar in Zuid-Holland vindt dit proces met name plaats en wat is er ter plaatse de snelheid?
4. Hoe ziet de grondwaterbalans er voor Zuid-Holland uit voor de drie situaties genoemd bij punt 2?

Aan de resultaten van het onderzoek worden de volgende eisen gesteld:

- bij genoemde vragen moet duidelijk zijn wat de effecten zijn in het jaar 2050, 2100 en 2200. Indien van toepassing, moet aangegeven worden wanneer het zoet-zout grensvlak zich niet meer verplaatst en dus sprake is van een evenwicht;
- er dient een betrouwbaarheidsanalyse van de resultaten te worden uitgevoerd.

Het onderscheidend vermogen in het horizontale vlak dient, voor zover realiseerbaar, minimaal 250 x 250 m<sup>2</sup> te zijn.

## 1.4 Aanpak

Om een regionaal beeld te construeren van de verdeling van het zoete, brakke en zoute grondwater en de snelheid van verplaatsing daarvan binnen de provincie Zuid-Holland, is een grondwatermodel gebouwd, dat naast grondwaterstroming ook het transport van chloride simuleert.

<sup>2</sup> **Zoet:** chloridegehalte grondwater < 150 mg/l, **brak:** chloridegehalte tussen 150 mg/l en 1000 mg/l; **zout:** chloridegehalte > 1000 mg/l.

<sup>3</sup> Hierbij is niet alleen van belang de afname van de hoeveelheid zoet grondwater, maar ook eventuele toename in zoutconcentratie van brak/zout water.

De dichtheid van het grondwater in de provincie van Zuid-Holland is niet constant, omdat de zoutconcentratie van het water varieert. De stroming van grondwater wordt zodoende beïnvloed door verschillen in de dichtheid van het grondwater. Voor de modellering van het grondwatersysteem is daarom rekening gehouden met deze dichtheidseffecten. In alle modelleringen wordt de grondwaterstroming gekoppeld aan de verschillen in dichtheid en in dit geval dus indirect aan de verschillen in chlorideconcentraties.

De ontwikkeling van het modelinstrumentarium kent drie verschillende fasen:

1. Bouw grondwaterstromingsmodel;
2. Gevoelighedsanalyse en parameteroptimalisatie;
3. Bouw stoftransportmodel.

Om te beginnen is op basis van de rekencode MODFLOW (Harbaugh en McDonald, 1988) een grondwaterstromingsmodel opgebouwd. Het betreft een stationair model met tijdsgemiddelden voor de onttrekkingen en de dichtheid van het grondwater (op basis van chloridegegevens).

De hydrologische ondergrondparameters (kD- en c-waarden) in het grondwaterstromingsmodel zijn, door middel van gemeten zoetwaterstijghoogten, geoptimaliseerd met de representer methode (Valstar, 2001).

Met de geoptimaliseerde parameters en het berekende zoetwaterstijghoogte-patroon wordt een snelheidsverdeling berekend, die vervolgens wordt gebruikt in MOCDENS3D (Oude Essink, 1998 en 2001) om de verandering in de dichtheid (en daarmee het chloridegehalte) te simuleren. MOCDENS3D berekent de niet-stationaire verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater in de diepere delen van het grondwatersysteem.

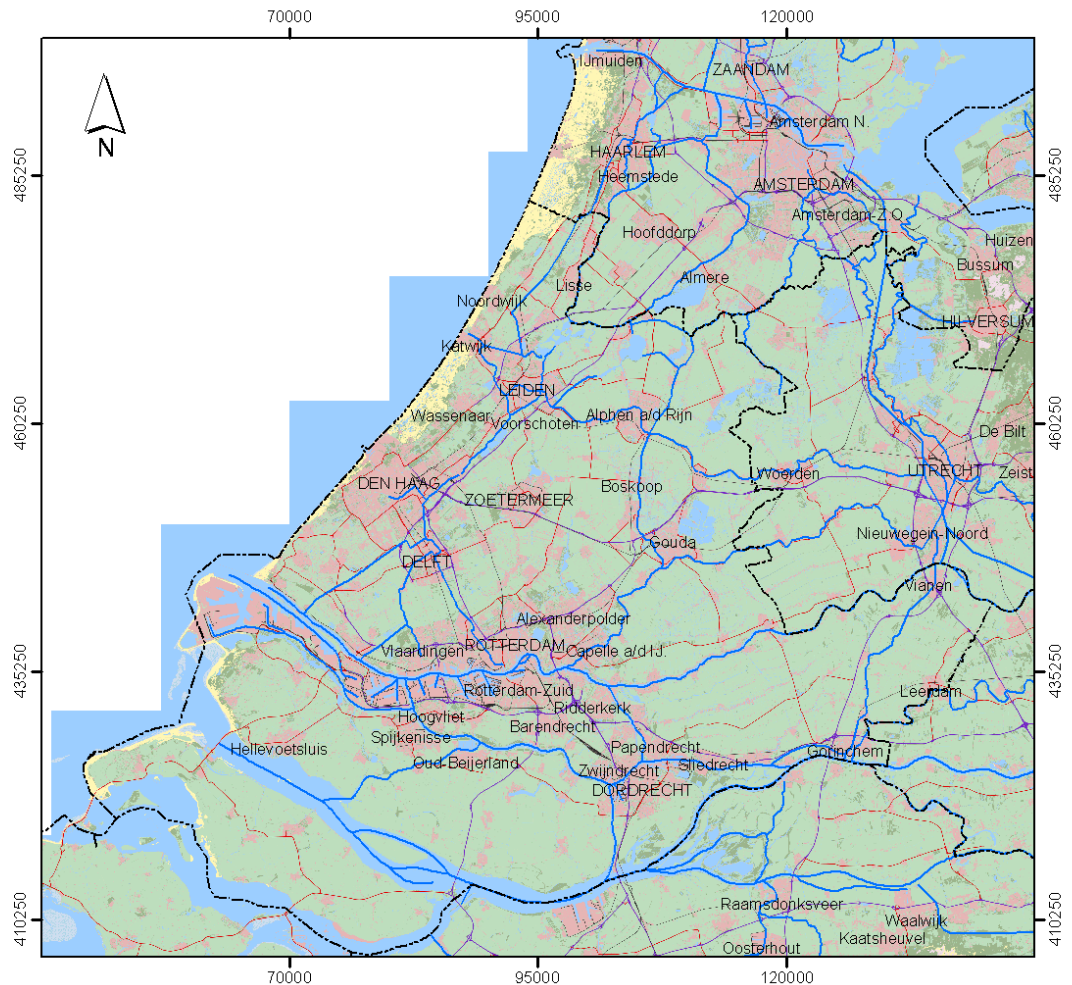
Deze code bestaat uit twee modules die volledig zijn geïntegreerd: (a) een grondwaterstroming module, MODFLOW (Harbaugh en McDonald, 1988), aangepast voor dichtheidsverschillen om niet-stationaire dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming te verzorgen; en (b) een stoftransport module, genaamd MOC3D (Konikow et al., 1996) om de verplaatsing van het dichtheidsveld te verzorgen (oorspronkelijk om 'gewoon' stoftransport te simuleren). Voorafgaand aan deze studie is MOCDENS3D reeds gebruikt in drie andere verziltingsstudies: Project Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel (i.s.m. Witteveen & Bos, 2000), Project Geohydrologisch Onderzoek Wieringerrandmeer (i.s.m. Grontmij, 2001), en Het Zout der Aarde (i.s.m. KIWA, 2002).

## 1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 van dit rapport geeft een overzicht van de locatie van het onderzoeksgebied. De bouw van het grondwaterstromingsmodel komt aan de orde in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 betreft de gevoeligheidsanalyse en parameteroptimalisatie en hoofdstuk 5 beschrijft de bouw van het stoftransportmodel. Beschrijving en resultaten van de scenarioberekeningen zijn gegeven in hoofdstuk 6, gevolgd door conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 7.

## 2 Beschrijving van het onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied beslaat het gehele beheergebied van de Provincie Zuid-Holland. Naast de provincie Zuid-Holland worden ook delen van aangrenzende provincies opgenomen: een groot deel van de provincie Utrecht, een deel van Noord-Holland (ten zuiden van IJmuiden), een deel van Noord-Brabant (ten noorden van Kaatsheuvel en Oosterhout) en een klein deel van westelijk Gelderland (figuur 1).



*Figuur 1 - Ligging van het onderzoeksgebied*

Voor een geohydrologische beschrijving van het gebied wordt verwezen naar REGIS (TNO-NITG, 1998).

## 3 Opzet van het grondwaterstromingsmodel

### 3.1 Inleiding

De verschillende fasen van de ontwikkeling van het modelinstrumentarium zijn:

1. Bouw grondwaterstromingsmodel;
2. Gevoelighedsanalyse en parameter optimalisatie;
3. Bouw stoftransportmodel.

Dit hoofdstuk beschrijft de bouw van het stationaire grondwaterstromingsmodel.

De chloridegehalten van het grondwater binnen de grenzen van de Provincie Zuid-Holland zijn dusdanig hoog dat deze significante ruimtelijke verschillen in dichtheid van het grondwater veroorzaken. Om de grondwaterstroming juist te simuleren dient daarom rekening te worden gehouden met deze dichtheidsverschillen. Daarom is de oorspronkelijke modelcode van MODFLOW voor dit model uitgebreid met een dichtheidscomponent MOCDENS3D. Hierdoor is het mogelijk verschillen in de initiële dichtheidsverdeling mee te nemen in de berekening van de snelheidsverdeling en in de parameteroptimalisatie.

### 3.2 Horizontale modelschematisatie

Het model beslaat het gehele beheergebied van de Provincie Zuid-Holland inclusief delen van aangrenzende provincies. Het modelnetwerk is zodanig gekozen dat dit ruim overeenstemt met een relevante hydrologische begrenzing. Hierdoor zal het effect van randvoorwaarden op de grondwaterstroming alsmede op de verandering in de zoetzoutverdeling in het onderzoeksgebied beperkt blijven gedurende de te simuleren periode van twee eeuwen.

Het grondwaterstromingsmodel bestaat uit 1332000 cellen van 250 bij 250 meter, equidistant verdeeld over 370 rijen, 400 kolommen en 9 lagen. Het totale modelgebied (Noordzee en vaste land) beslaat een oppervlak van 925000 hectare.

### 3.3 Verticale modelschematisatie

Dit onderzoek richt zich op de verzilting van het grondwater binnen de watervoerende pakketten, niet op het grondwater in de deklaag. Daarom is hier gekozen voor een model zonder een gedetailleerd topsysteem. In dit onderzoek is gekozen voor een grondwaterstromings- en stoftransportmodel van de watervoerende pakketten en de daartussen liggende scheidende lagen, waarbij het topsysteem als bovenrand van het model zal functioneren. Dit betekent dat het model (zoetwater)stijghoogten in de watervoerende pakketten zal berekenen, maar géén freatische grondwaterstanden.

De keuze voor 9 modellagen komt overeen met de 9 belangrijkste watervoerende pakketten in de ondergrond van West-Nederland. Voor stoftransport worden deze lagen verder onderverdeeld in dunnere lagen (paragraaf 5.3). De verticale modelschematisatie in 9 modellagen is weergegeven in tabel 1.

Tabel 1 Verticale modelschematisatie in 9 modellagen

<b>Formatie</b>	<b>Hydrogeologische indeling</b>	<b>Modellaag</b>
<i>Westland</i>	<i>Deklaag / freatisch pakket</i>	1
Westland, Nuenen groep, Twente	Verticale weerstand deklaag	
<i>Twente</i>	<i>Eerste watervoerend pakket</i>	2
Eem	Eerste scheidende laag: Eem	
<i>Eem</i>	<i>Tweede watervoerend pakket</i>	3
Drente	Tweede scheidende laag: Drente	
<i>Drente, Kreftenheye</i>	<i>Derde watervoerend pakket</i>	4
Urk	Derde scheidende laag: Urk	
<i>Urk / Sterksel</i>	<i>Vierde watervoerend pakket</i>	5
Enschede / Kedichem	Vierde scheidende laag: Enschede en Kedichem	
<i>Kedichem, Harderwijk</i>	<i>Vijfde watervoerend pakket</i>	6
Tegelen	Vijfde scheidende laag: Tegelen- en Belfeldklei	
<i>Tegelen</i>	<i>Zesde watervoerend pakket</i>	7
Maassluis	Zesde scheidende laag: Maassluis	
<i>Maassluis</i>	<i>Zevende watervoerend pakket</i>	8
Oosterhout	Zevende scheidende laag: Kalloklei	
<i>Oosterhout</i>	<i>Achtste watervoerend pakket</i>	9
Oosterhout	Slecht doorlatende basis	

De toekenning van de diepteliggings, kD- en c-waarden wordt beschreven in paragraaf 3.5.3.

### 3.4 Stationaire gegevensperiode, rand- en beginvoorwaarden

#### 3.4.1 Gegevensperiode

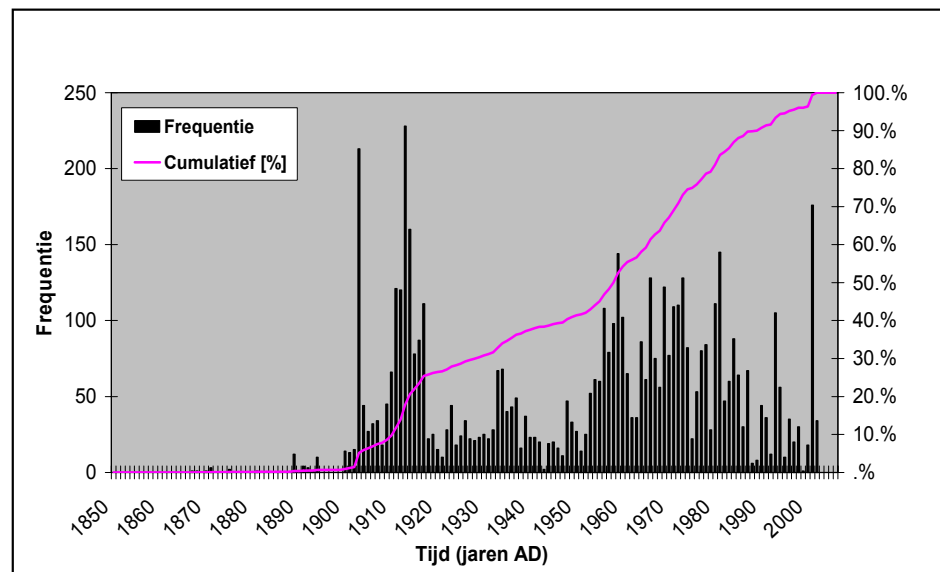
In het stationaire model zijn voor tijdsafhankelijke variabelen gemiddelde waarden toegekend. Gegevens voor het grondwaterstromingsmodel (peilen, grondwateraanvulling en onttrekkingen) zijn verzameld en gemiddeld over de periode 1993 tot en met 2002. Gegevens betreffende de dichtheid van het grondwater zijn verzameld over de periode 1867 – 2001. Bepaling van de initiële dichtheidsverdeling wordt hieronder besproken.

#### 3.4.2 Beginvoorwaarden

Een belangrijke beginvoorwaarde is de initiële dichtheidsverdeling van het grondwater. Om tijdens de ijking en de berekening van het snelheidsveld rekening te kunnen houden met verschillen in dichtheid, is een initiële dichtheidsverdeling van het grondwater nodig.



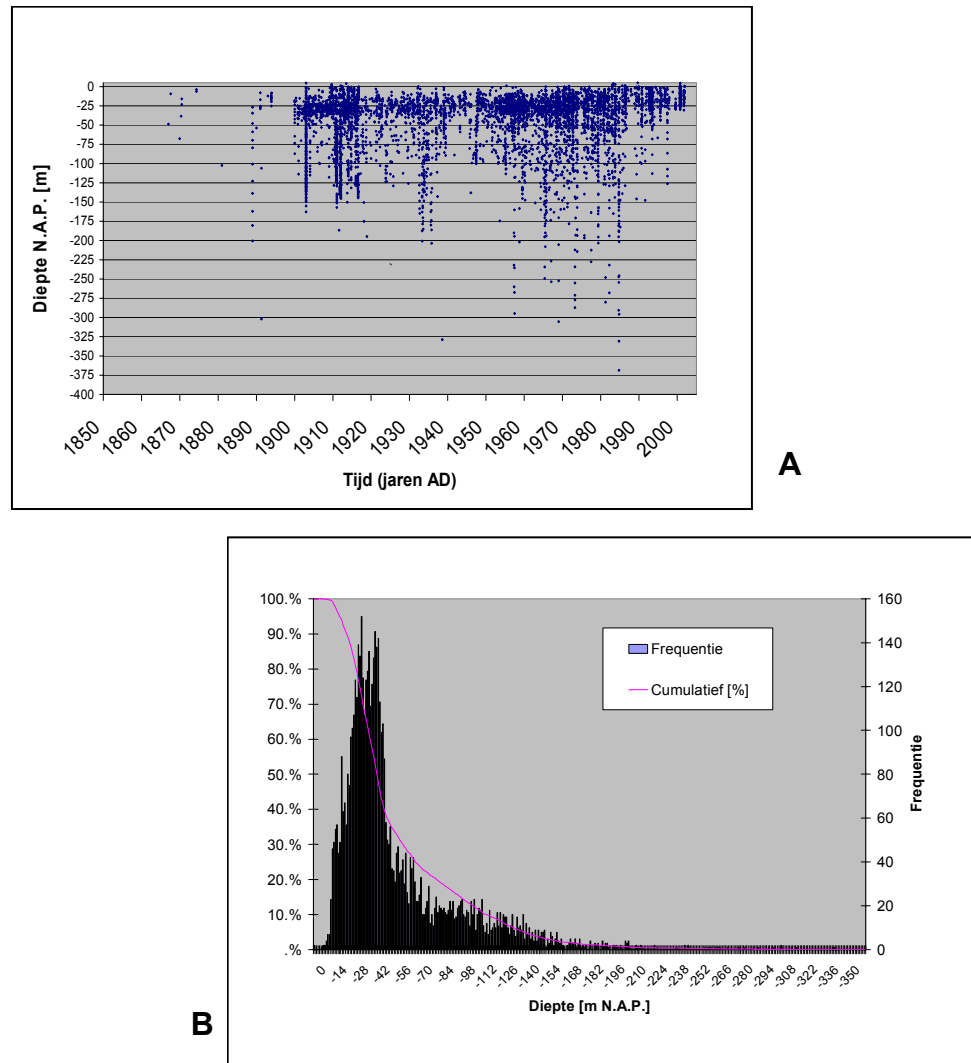
Deze dichtheidsverdeling is geconstrueerd aan de hand van chloridegehalten in peilbuizen in het gebied (x,y,z,concentratie) gemeten over de periode 1867-2001 (DINO (1999) en LGM en PGM bestanden provincie Zuid-Holland). Met deze gegevens is een driedimensionale interpolatie uitgevoerd volgens de methode van Hardy (1971). De meest recente 5772 chlorideconcentratie metingen in de Provincie Zuid-Holland zijn gebruikt om de driedimensionale initiële dichtheidsmatrix te bepalen (figuur 2). De jaartallen 1903 en 1913 vallen op door de intensieve meetcampagnes in de duingebieden. De helft van de gebruikte chloridemetingen zijn van vóór 1960. Ook deze gegevens zijn gebruikt omdat ze de betrouwbaarheid van de initiële dichtheidsverdeling verhogen.



Figuur 2 - Histogram aantal metingen (links) en percentage metingen (rechts) als een functie van het jaartal van meting.

De betrouwbaarheid van de initiële dichtheidsverdeling is sterk afhankelijk van het aantal chloridemetingen. Op grotere diepten (figuur 3) zijn weinig metingen beschikbaar. Slechts 10% van de metingen ligt dieper dan -100 m N.A.P.; 2% en 1% van de metingen liggen respectievelijk dieper dan -157 en -187 m t.o.v. N.A.P. Juist op deze dieptes juist komt vaak brak en zout grondwater voor. Het gevolg is, dat de initiële dichtheidsverdeling onderin het systeem ter plaatse onnauwkeuriger is dan bovenin.

Het verkregen dichtheidsveld is gebruikt als uitgangspunt voor de stationaire stromingsberekening. Zie paragraaf 5.5.1 voor de verdere verwerking van de dichtheidsverdeling.



Figuur 3 - a. Diepteligging van de meting als een functie van het jaartal van meting en b. aantal metingen per diepte en percentage van het totaal als een functie van de diepte. Op grotere diepten zijn weinig metingen beschikbaar (slechts 10% van de metingen ligt dieper dan -100 m N.A.P.), waardoor de initiële dichtheidsverdeling daar ter plaatse onnauwkeuriger is.

### 3.4.3 Randvoorwaarden

De initiële zoetwaterstijghoogten aan de bovenrand en aan de zijranden zijn gemeten stijghoogten, die zijn gecorrigeerd op basis van de initiële dichtheidsverdeling en de diepte.

Aan de bovenrand van het model geldt een zogenaamde Cauchy (gemengde) randvoorwaarde. Dit betekent dat het model op deze randen een peil – weerstand relatie bevat. Met behulp van een ‘General Head Boundary’ package worden initiële peilen opgegeven.

Om de bovenrandvoorwaarde voor het model vast te leggen is een digitale kaart nodig met de freatische grondwaterstanden die afgeleid worden van waterpeilen in boezems,

plassen, rivieren en kanalen en polders. Een gedetailleerde beschrijving van de invulling van de peilen en de daarvoor gebruikte bronnen is opgenomen in Bijlage A.

Aan de zijranden zijn vaste zoetwaterstijghoogten opgegeven. Hierbij is ervan uitgegaan dat de druk hydrostatisch verloopt met de diepte. Dit betekent dat de druk lineair toeneemt met de diepte op basis van het soortelijke gewicht van het water.

### 3.5 Parametrisatie

#### 3.5.1 *Netto grondwateraanvulling*

In een deel van het model, namelijk infiltratiegebieden zonder waterlopen, zoals een deel van het duingebied, is geen vast peil opgegeven; hier is uitgegaan van een netto grondwateraanvulling. Deze is geschat op een gemiddelde waarde van 0,7 mm/dag.

#### 3.5.2 *Onttrekkingen*

Onttrekkingsgegevens zijn afkomstig van vier verschillende bronnen:

1. Provincie Zuid-Holland;
2. Provincie Utrecht;
3. Provincie Noord-Holland;
4. Provincie Noord-Brabant.

Voor Noord-Holland en Noord-Brabant zijn de pompfilterdieptes bekend. Deze onttrekkingen zijn toegekend aan de bijbehorende MODFLOW modelcel. Van de onttrekkingen in Zuid-Holland en Utrecht is naast de locatie alleen bekend uit welk watervoerend pakket wordt onttrokken. De precieze diepte is niet bekend. Daarom zijn voor deze onttrekkingen de debieten evenredig verdeeld over de dikte van het watervoerende pakket.

Aangezien de onttrekkingsdebieten van jaar tot jaar slechts geringe verschillen vertonen is uit de gegevens reeks één representatief jaar gekozen; de ingevoerde onttrekkingsdebieten zijn alle afkomstig uit het jaar 2001.

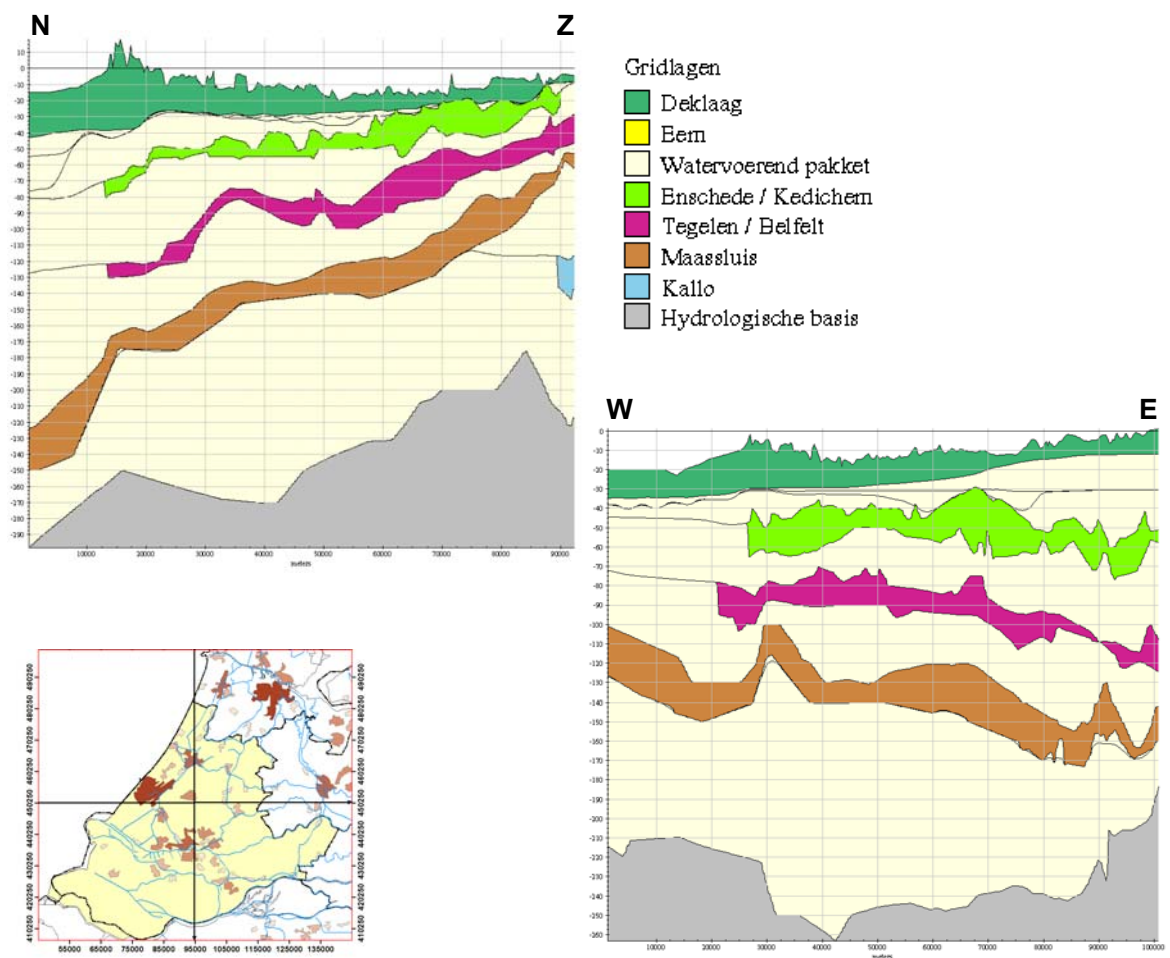
#### 3.5.3 *kD- en c-waarden en REGIS*

Een geologische en hydrogeologische kartering van de ondergrond van (de omgeving rondom) de provincie Zuid-Holland is beschikbaar binnen REGIS (TNO-NITG, 1998). In REGIS zijn de in de ondergrond van Nederland voorkomende kleilagen gekarteerd als zogenaamde gidslagen. Deze gidslaagkartering is het resultaat van een ruimtelijke interpolatie van de in boringen aangetroffen kleitrajecten. Van veel kleitrajecten in een boring is namelijk vastgesteld tot welke formatie zij behoort. Door de resultaten van verschillende boringen ruimtelijk met elkaar te correleren, en bijvoorbeeld te combineren met kennis over de ruimtelijke continuïteit van een kleilaag, is een gebiedsdekkende kartering gemaakt van de verbreiding en de dikte van de verschillende kleilagen. Ook andere herkenbare en korreleerbare lagen, zoals een schelpenlaag of een pakket fijne zanden in een dikke kleilaag, kunnen bij de kartering binnen REGIS een gidsfunctie vervullen. Lagen met een gidsfunctie worden in REGIS als een gidslaag opgenomen indien minstens één van de grensvlakken van de laag een op schaal 1:50000 relevant en karteerbaar hydraulisch contrast in de ondergrond vormt.

REGIS omvat naast informatie over de verbreiding en dikte van de lagen ook informatie over de diepteligging van de lagen. Daar waar de slecht doorlatende laag van een bepaald niveau afwezig is, wordt wél een fictieve diepteligging (van de top) toegekend, maar is de dikte van het niveau gelijk aan nul. Op deze wijze zijn alle onderscheiden niveaus binnen het gehele gebied gedefinieerd.

Om het aantal modellagen te beperken en te voorkómen dat voor ieder klein kleivóorkomen een nieuwe modellaag wordt gedefinieerd, is een aantal dicht tegen elkaar gelegen kleilagen samengevoegd tot één scheidende laag. Wel is elke afzonderlijke formatie met een hydrologisch scheidend karakter, als een afzonderlijke scheidende laag in het grondwatermodel verwerkt.

Als onderdeel van deze activiteit zijn de zogenaamde hypothetische grensvlakken gegenereerd met behulp van het softwareprogramma Construction Underground Schemes (TNO-NITG, 2001). Deze hypothetische grensvlakken hebben hydrogeologisch geen betekenis maar zijn noodzakelijk voor de continuïteit van de modellagen. De dikten van de modellagen en de tussenliggende scheidende lagen zijn gebaseerd op het met CUS geconstrueerde geometrie van gidslagen en hypothetische grensvlakken. In figuur 4 is een voorbeeld gegeven van een profiel met daarin de gidslagen van REGIS plus de hypothetische grensvlakken (grijze lijnen).



Figuur 4 – Gidslagen in noord-zuid en west-oost profiel.

Binnen REGIS zijn op basis van de lithologie van de boringstrajecten zogenaamde litho-k-waarden vastgesteld. Voor deze studie zijn per modellaag de voorkomende horizontale k-waarden gemiddeld. Deze waarden zijn getoetst op basis van expert-judgement. De horizontale k-waarden zijn weergegeven in tabel 2.

De initiële kD-waarden zijn berekend, door deze k-waarden per modellaag te vermenigvuldigen met de uit CUS gegeneerde dikten van de watervoerende lagen in het grondwatermodel.

Analoog aan de toekenning van de horizontale k-waarden zijn voor de scheidende lagen ook schattingen gemaakt van de verticale k-waarden. De initiële c-waarden zijn berekend door vermenigvuldiging van de verticale weerstand per meter dikte met de dikten van de scheidende lagen, afkomstig uit REGIS.

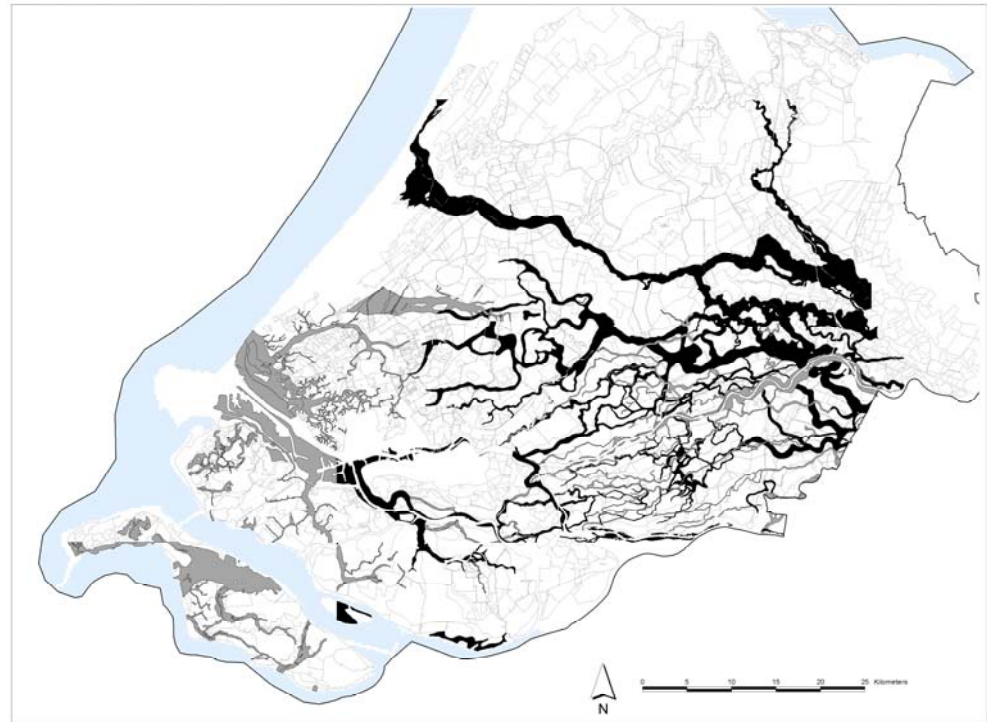
Tabel 2 Gehanteerde horizontale k-waarden en verticale weerstanden per modellaag voor de berekening van de initiële kD- en c-waarden.

Modellaag	Toegepaste horizontale k-waarde [m/dag]	Toegepaste verticale weerstand per meter dikte [dagen/m]
1	0.10	
		deklaagweerstand <sup>2)</sup>
2	22	
		200
3	22	
		1000
4	22	
		20
5	22	
		200
6	4-40 <sup>1)</sup>	
		200
7	4-40 <sup>1)</sup>	
		20
8	8	
		20
9	8	

1) horizontale k-waarden uit REGIS; geleidelijke toename van zuid-west naar noord-oost van 4 m/d naar 40 m/d;

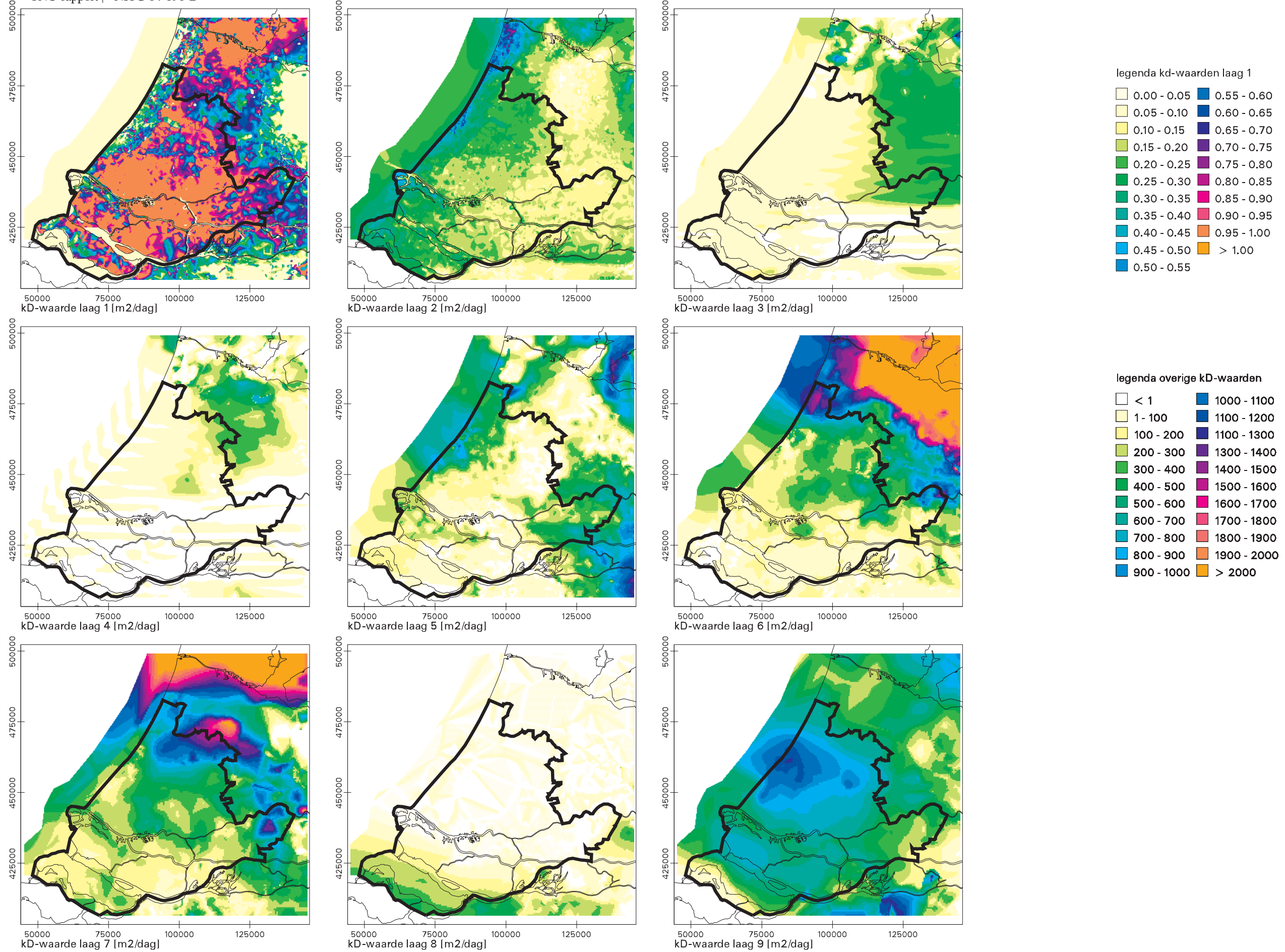
2) weerstand gebaseerd op de onlangs uitgevoerde deklaagkartering op basis van ondiepe DINO-boorgegevens (Van der Linden, e.a., 2002).

De deklaagweerstand uit REGIS is vervangen door weerstanden afkomstig van de onlangs uitgevoerde deklaagkartering op basis van ondiepe DINO-boorgegevens (Van der Linden e.a., 2002). Deze deklaagweerstand is vervolgens gecorrigeerd voor de aanwezigheid van zandbanen in het gebied die de deklaag lokaal doorsnijden, waardoor de weerstand lokaal kleiner is (figuur 5).

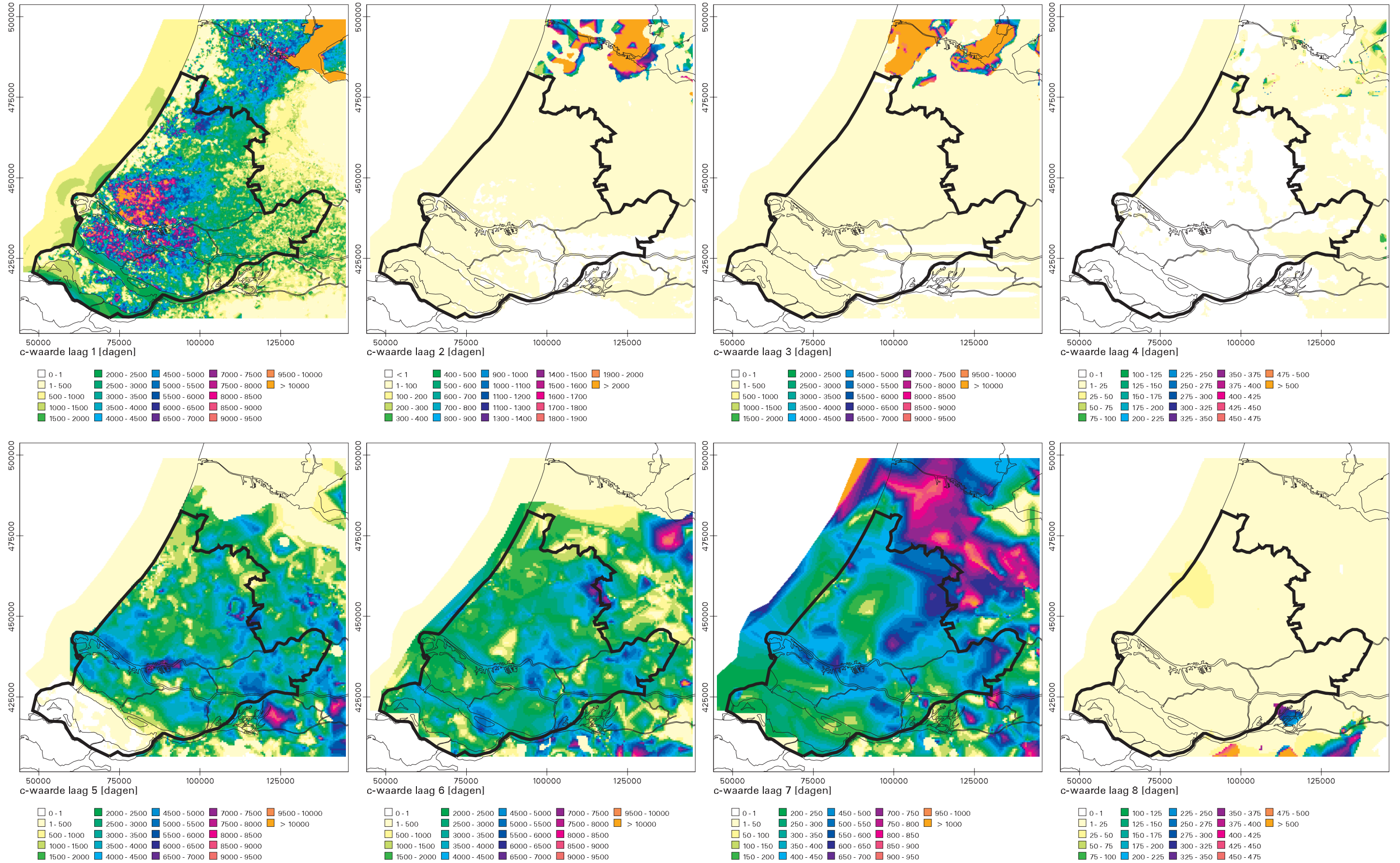


*Figuur 5 - Zandbanen in de ondergrond van Zuid-Holland zorgen lokaal voor een afname van de deklaagweerstand.*

De resulterende initiële  $kD$ - en  $c$ -waarden zijn weergegeven in figuur 6 en figuur 7.



Figuur 6 - Initiele kD-waarden



Figuur 7 - Initiele c-waarden



## 4 Gevoeligheidsanalyse en parameteroptimalisatie

De ijking van het grondwaterstromingsmodel is onderverdeeld in 4 stappen:

1. Bouw van het uitgangsmodel;
2. Gevoeligheidsanalyse;
3. Speurtocht naar conceptfouten;
4. Parameteroptimalisatie.

De stappen uit het ijkproces worden hieronder besproken.

### 4.1 Bouw van het uitgangsmodel

De bouw van het grondwatermodel uit de basisgegevens is beschreven in het vorige hoofdstuk. Dit model is echter nog geen uitgangsmodel waarmee geijkt kan worden omdat hierin mogelijk nog fouten zitten. Bij het fitten van modelresultaten en metingen (lees ijking) zouden deze fouten worden vertaald naar verkeerde/onrealistische parameterwaarden. Bijvoorbeeld indien een onttrekking wordt ‘vergeten’ en wel een meting wordt gebruikt die in de onttrekkingskegel ligt, dan levert de ijking rare kD-waarden of zeer grote, gecorreleerde, afwijkingen op. Het is daarom van belang deze conceptfouten zoveel mogelijk op te sporen omdat deze een structurele afwijking in het model opleveren (zgn. bias).

In wezen zou het model als een geavanceerde interpolator kunnen worden gezien die op elke cel een reeks genereert. Indien gesommeerde kwadratische afwijkingen worden gezien als maat voor de ‘juistheid’ van het model (ijkcriterium), dan is het zaak om een structurele bias zoveel mogelijk kwijt te raken omdat deze elke keer kwadratisch doorweegt in het ijkcriterium. Statistisch gezien is een eerste/belangrijkste eis een gemiddelde afwijking van 0 (unbiased).

#### 4.1.1 *Opbouw meetset*

Om te beginnen zijn alle metingen verzameld, die binnen het studiegebied liggen en waarvan, naast een stijghoogtemeting ook een chloridegehalte aanwezig is. Om te kunnen rekenen met grondwater met verschillende dichtheden, zoals dat voorkomt in het Nederlandse kustgebied, moet je eigenlijk alles omrekenen naar drukken. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten gecorrigeerd voor de dichtheid, wat resulteert in een omrekening naar zoetwaterstijghoogten. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten is lastig: zo staan de isolijnen van zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid niet gelijk is aan die van zoet water.

Voor de berekening van zoetwaterstijghoogten dient behalve de gemeten stijghoogte dus ook de dichtheid van het grondwater in het filter bekend te 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.

Er heeft een zorgvuldige selectie plaatsgevonden van de meetgegevens. Alle metingen die vallen binnen de periode 1993 tot en met 2002 zijn geselecteerd. Foutieve metingen of metingen, die door zeer locale effecten sterk beïnvloed worden, zijn verwijderd:

- reeksen waarvan de mediaan grote afwijking vertoont van het gemiddelde of waarvan de mediaan, op basis van visuele inspectie, niet representatief is gebleken voor de meetreeks;
- reeksen van minder dan 40 metingen;
- reeksen van meetpunten met filters in scheidende lagen tussen twee watervoerende pakketten;
- reeksen van meetpunten in de deklaag (er worden alleen stijghoogten berekend);
- reeksen van meetpunten die dichter dan 250 meter vanaf een onttrekking groter dan 50.000 m<sup>3</sup>/jaar liggen, dat wil zeggen in de cel van de onttrekking. De kegel wordt namelijk sterk afgevlakt door de ruimtelijke discretisatie van het model.

Na bovenstaande voorbereidingen van de oorspronkelijk 6079 meetpunten bestaat de meetset ten behoeve van de ijking uit 527 punten.

De metingen zijn per reeks gemiddeld om te komen tot een meetset waarop is geijkt. Afhankelijk van de betrouwbaarheid van de schatting van het gemiddelde van de meetreeks, is het gewicht van de reeksen gevarieerd. De betrouwbaarheid is afhankelijk van de volgende factoren:

- aantal metingen in de tijd en variatie van de meetreeks (betrouwbaarheid gemiddelde neemt toe met een groter aantal metingen en met een kleinere variatie);
- afwijking gemiddelde-mediaan (hogere afwijking duidt op grotere invloed extremen).

## 4.2 Gevoeligheidsanalyse

Doel van de gevoeligheidsanalyse is om onderscheid te kunnen maken tussen gevoelige en niet-gevoelige modelparameters, immers, de niet-gevoelige parameters kunnen niet worden geijkt. Het gaat hierbij om de gevoeligheid van de zoetwaterstijghoogte  $h$  voor modelparameters, waarbij inzicht wordt verkregen in de reactie van zoetwaterstijghoogten op veranderingen van de modelparameters. Bijvoorbeeld hoeveel verandert  $h$  indien  $kD$  fractioneel wordt vergroot/verkleind.

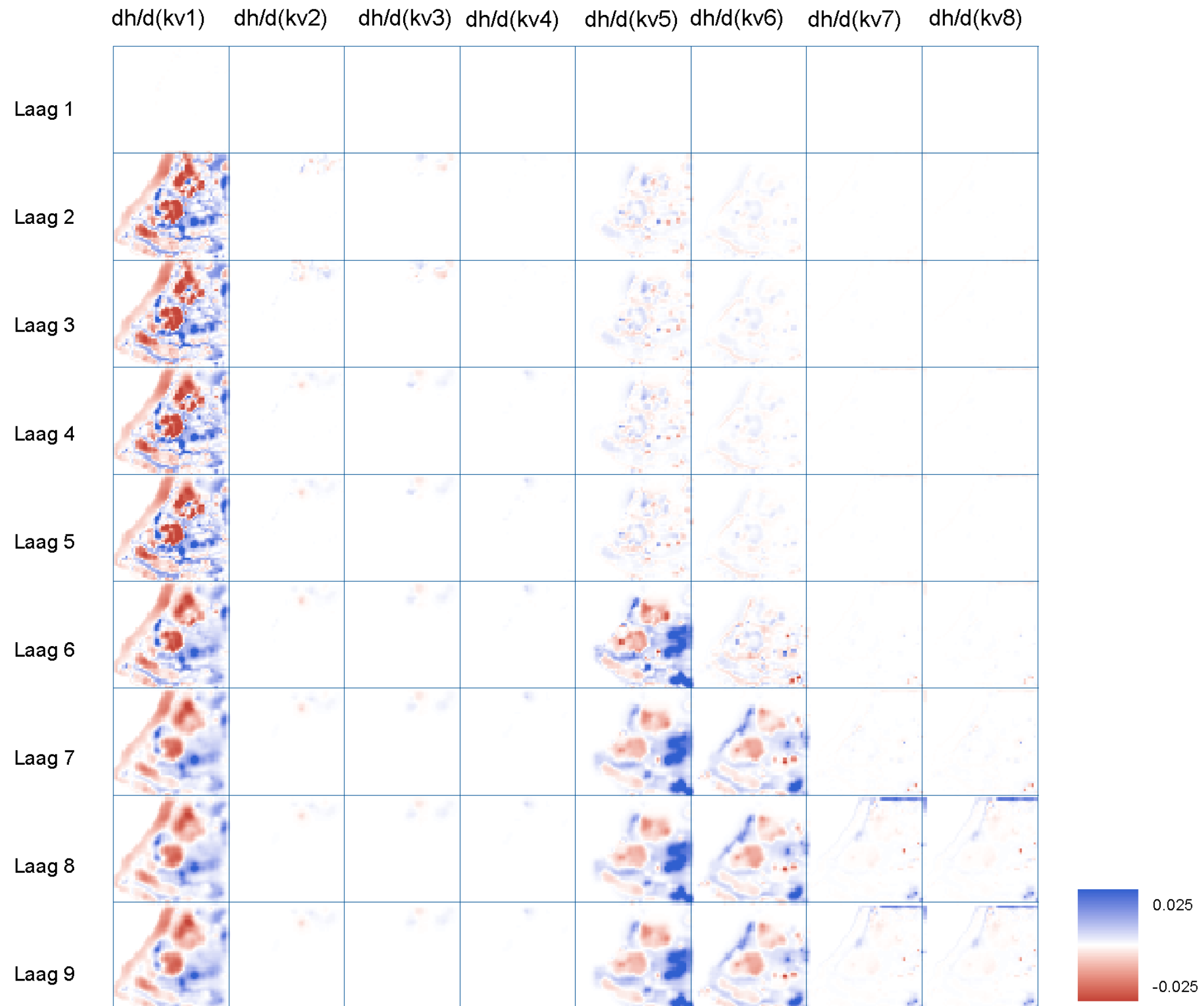
Figuur 8 toont de invloed van een fractionele verhoging van de  $kD$ -waarden van de watervoerende lagen. Per kolom is slechts één parameter gewijzigd, maar de effecten op de zoetwaterstijghoogten zijn voor alle modellagen afgebeeld. Rode zones tonen een toename van de zoetwaterstijghoogte bij een toename van de  $kD$ -waarde, blauwe zones tonen een afname van de zoetwaterstijghoogte bij een toename van de  $kD$ -waarden. De figuur laat bijvoorbeeld duidelijk zien dat de  $kD$ -waarde van het freatische pakket relatief ongevoelig is, en daarmee slecht ijkbaar. Aangezien de absolute waarde erg klein is, heeft dit weinig gevolgen. Daarnaast blijkt dat de gevoeligheid voor aanpassingen in de  $kD$ -waarden zowel naar boven als naar beneden toe doorwerkt; wanneer de  $kD$ -waarde van een modellaag wordt veranderd, is dit zowel in de modellagen er boven als in de modellagen er onder merkbaar.

Figuur 9 toont de invloed van een fractionele verhoging van de weerstand van een scheidende laag in het model. Hierin is bijvoorbeeld te zien dat het model vooral gevoelig is voor de  $c$ -waarde van de deklaag en van scheidende laag 5 en 6. Het zijn vooral deze regionaal verbreide kleilagen waarvoor het model gevoelig is.

Daarnaast valt op dat er een grotere gevoeligheid bestaat voor de  $kD$ -waarden dan voor de  $c$ -waarden. De gevoeligheid voor de  $c$ -waarde strekt zich, in tegenstelling tot de gevoeligheid voor de  $kD$ -waarde, vooral naar beneden uit. Een verandering van de  $c$ -waarde in scheidende laag 6 (tussen watervoerend pakket 6 en 7) heeft bijvoorbeeld vooral effect op de zoetwaterstijghoogte in modellaag 7 t/m 9.



Figuur 8 - Modelgevoeligheid voor verandering van de kD-waarden: in kolom 1 als gevolg van een fractionele verhoging van de kD in modellaag 1, in kolom 2 van de kD in modellaag 2, enzovoort. Daaronder is steeds voor elke modellaag de verandering in de zoetwaterstijghoogte als gevolg van deze verandering afgebeeld. De kleur rood resp. blauw geven aan dat de zoetwaterstijghoogte omhoog resp. omlaag gaat als de kD wordt verhoogd.



Figuur 9 - Modelgevoeligheid voor verandering van de verticale doorlatendheid  $k_v$  tussen twee modellen, in kolom 1 als gevolg van een fractionele verhoging van de  $k_v$  tussen modellen 1 en 2, in kolom 2 van de  $k_v$  tussen de modellen 2 en 3, enzovoort. Daaronder is steeds voor elke model laag de verandering in de zoetwaterstijghoogte als gevolg van de veranderde parameterwaarde afgebeeld. De kleur rood resp. blauw geven aan dat de zoetwaterstijghoogte omhoog resp. omlaag gaat als de  $k_v$  wordt verhoogd.



ware gekeken naar signalen die aangeven hoe goed het laatst gevormde ‘uitgangsmodel’ voldoet. Hierbij wordt gebruikgemaakt van berekende zoetwaterstijghoogten en van fluxen tussen de modellen.

De waarden van de geijkte parameters en de afwijkingen tussen metingen en model zijn geanalyseerd op statistieken, ruimtelijke trends, enz. Er is voortdurend getracht voor uitschieters of ruimtelijke gecorreleerde afwijkingen en/of onrealistische parameterwaarden oorzaken te vinden in modelfouten en deze weer te verwerken naar een nieuw uitgangsmodel, waarna dezelfde stappen opnieuw werden herhaald. Deze cyclus van analyse en verbetering van uitgangsmodel is voor het model 30 maal herhaald. Deze inspanning is gerechtvaardigd omdat fouten in het modelconcept zich vertalen in fouten van de geijkte parameters bij het verkleinen van de residuen tussen metingen en model. Daarbij bestaat zoals eerder genoemd het gevaar dat hele kleine residuen (optisch goed model door goede fit) gepaard kunnen gaan met grotere fouten in de geoptimaliseerde parameters. Het resulterende ‘uitgangsmodel’ vormt de basis voor de parameteroptimalisatie met behulp van representers.

#### 4.4 Parameteroptimalisatie

##### 4.4.1 *Representers*

De ijking van het uitgangsmodel, na verwijdering van nog aantoonbare structurele fouten, is technisch uitgevoerd met behulp van een methode gebaseerd op representers (Valstar, 2001). Dit levert (wiskundig aantoonbaar) een optimaal model gegeven een bepaalde meetset.

Representers zijn functies die de relatie tussen de ruimtelijke variatie van modelparameters en individuele metingen beschrijven (Valstar, 2001). Het voordeel van deze methode is dat geen zones met een constante parameterwaarde meer hoeven te worden gedefinieerd en dat de in de stijghoogtemetingen aanwezige informatie over parameterwaarden optimaal benut wordt. Er dient te worden benadrukt dat dit het enige is dat de representer methode (automatisch) voor de modelleur doet: op een slimme manier de gevoeligheid tussen parameters en metingen vertalen in een optimale ‘zonering’ en de waarden hiervan aanpassen. De mate van aanpassing hangt namelijk nog steeds af van keuzen van de modelleur en de kwaliteit van het geijkte model hangt net als bij willekeurige andere methoden af van de kwaliteit van het uitgangsmodel en de hoeveelheid en de kwaliteit van de metingen. Wel ‘kijkt’ de representer methode veel en veel genuanceerder dan enig andere (automatische) methode, zodat de in de stijghoogtemetingen aanwezige informatie over parameterwaarden veel beter wordt benut.

Zoals in de paragraaf ‘gevoeligheidsanalyse’ reeds beschreven, zijn representers functies die de relatie tussen de ruimtelijke variatie van modelparameters en individuele metingen beschrijven. Het voordeel van deze methode boven zonale ijking (zoals in PEST) is dat de in de stijghoogtemetingen aanwezige informatie over parameterwaarden optimaal benut wordt: bij toepassing van PEST is het effect van een zonale wijziging van een parameterwaarde op de stijghoogten (lees: gevoeligheid) bekend. Echter, bij toepassing van de representers is de stijghoogteverandering in een willekeurige individuele cel met een meting als gevolg van een parameterwijziging in

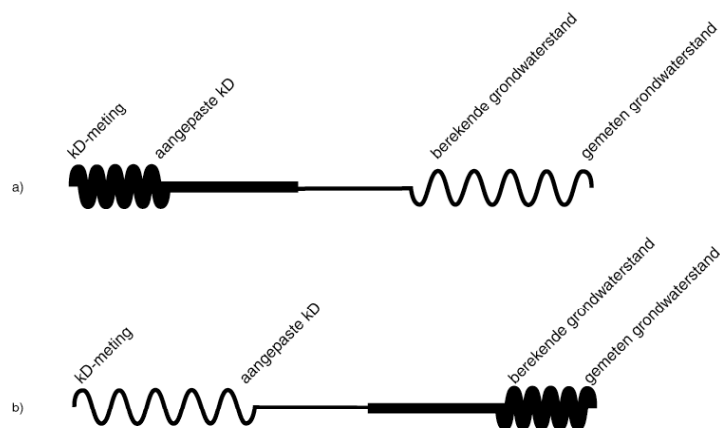
een andere willekeurige individuele cel bekend. De nadelen van het moeten zoneren bij toepassing van PEST, zijn daarmee verdwenen.

#### 4.4.2 Concurrentie tussen twee soorten metingen

Voorafgaand aan de parameteroptimalisatie moet een keuze worden gemaakt hoeveel er mag worden afgeweken van de aanvankelijk gekozen parameterwaarden. Tenzij een model conceptueel perfect is, geldt dat hoe strakker hieraan wordt vastgehouden, hoe groter de residuen na ijking zullen zijn. Het vinden van de gewenste balans tussen residuen en aanpassingen van parameterwaarden vereist een intensieve communicatie met alle partijen. In figuur 10 is getracht deze zoektocht naar deze balans weer te geven.

Wanneer b.v. een partij veel geloof hecht aan een gemeten  $kD$ -waarde uit een pompproef, zal volgens deze partij het gewicht dat aan deze  $kD$ -meting toegekend moet worden, relatief groot zijn (in figuur 10a: ‘treksterkte’ van linker veer is groter dan van rechter veer). Het model zal dan tijdens de parameteroptimalisatie weinig ruimte hebben om veel van de  $kD$ -meting af te wijken; mogelijk heeft dat een relatief grote afwijking tussen gemeten en berekende grondwaterstanden tot gevolg.

Een andere partij kan juist meer waarde hechten aan een meting van de grondwaterstand. Deze partij zal een grote veersterkte aan de gemeten grondwaterstand willen toekennen (in figuur 10b: ‘treksterkte’ van rechter veer is groter dan van de linker veer). Het model zal deze grondwaterstand mogelijk alleen goed kunnen nabootsten als tegelijkertijd een kleinere veersterkte aan de  $kD$ -meting wordt toegekend.



Figuur 10 - Concurrentie tussen een  $kD$ -meting en een meting van een grondwaterstand

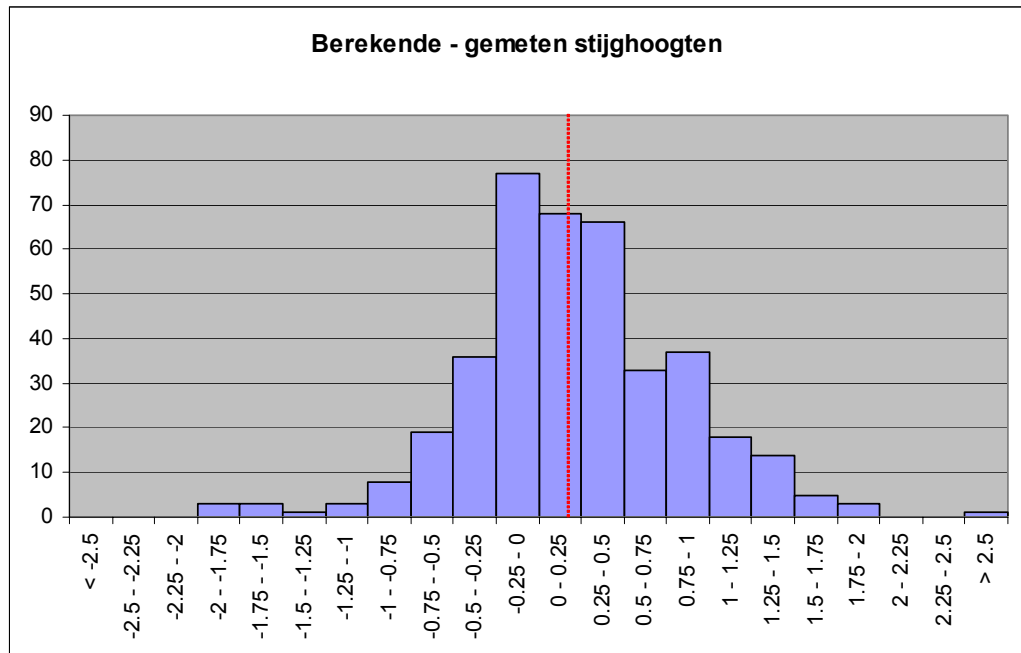
Essentieel hierbij is zich te realiseren dat bij de toekenning van de ‘treksterkten’ aan de veren geen enkel ‘automatisch’ aspect verstopt zit (in tegenstelling tot de parameteroptimalisatie zelf), maar dat dit een (subjectieve) beslissing van de modelleur is. Juist bij deze toekenning speelt de open discussie met alle partijen over de toe te kennen ‘treksterkten’ een belangrijke rol in het modelleerproces.



## 4.5 Resultaten

### 4.5.1 Residuen

De residuen vóór en na ijking zijn ruimtelijk weergegeven in Bijlage B. Een histogram van de residuen na ijking is weergegeven in figuur 11.



Mediaan van de verschillen	0.17 m
Mediaan van de absolute waarde van de verschillen	0.36 m
Som (verschillen <sup>2</sup> ) / aantal metingen	0.45 m <sup>2</sup>

Figuur 11 – Histogram van de residuen na parameter optimalisatie (de rode stippellijn geeft de mediaan weer).

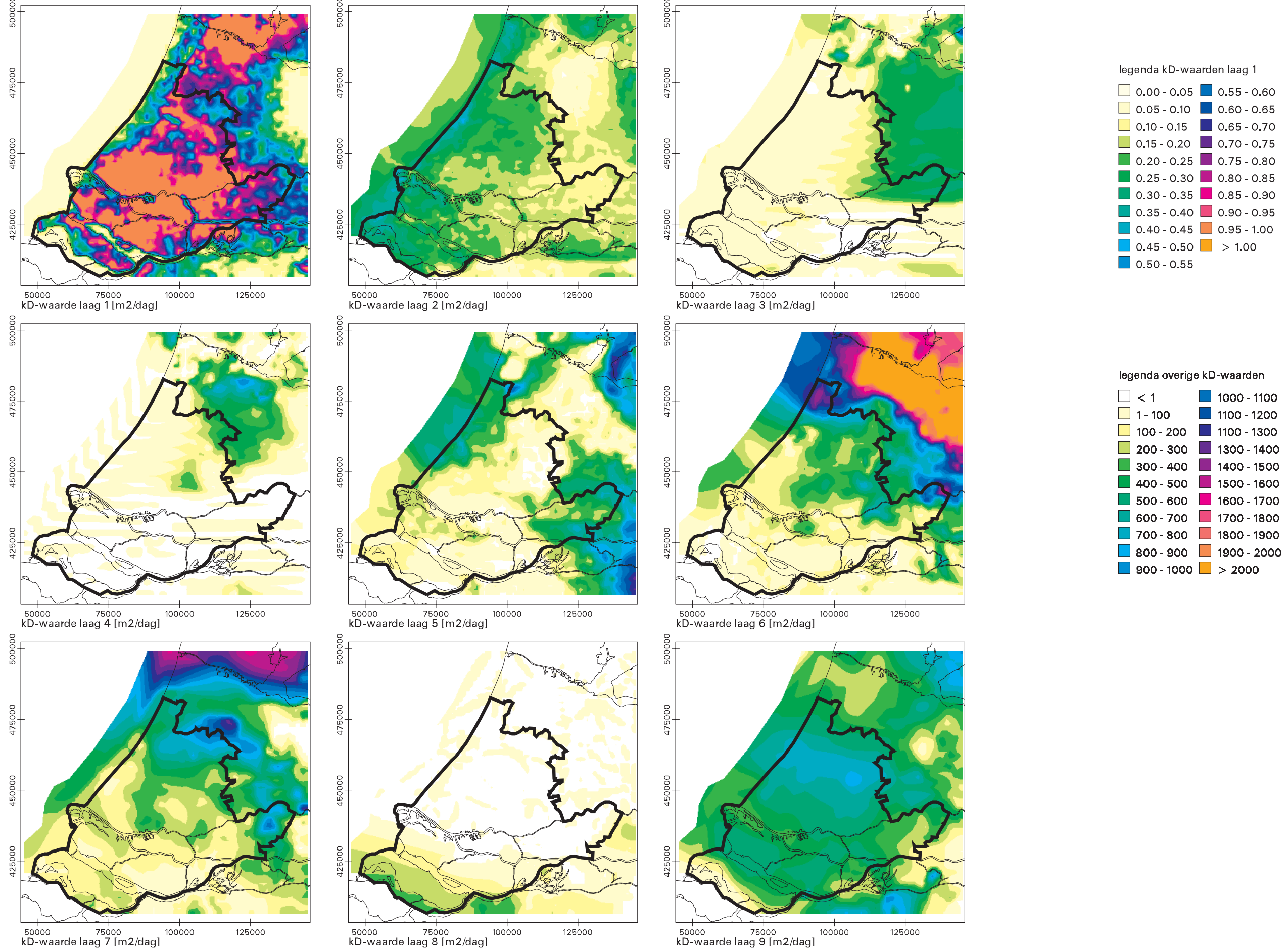
### 4.5.2 *kD*- en *c*-waarden

In figuur 12 en figuur 13 zijn respectievelijk de *kD*- en *c*-waarden weergegeven na de parameteroptimalisatie. Bij vergelijking van de geoptimaliseerde parameters (figuur 12 en 13) met de initiële parameters (figuur 6 en 7), valt op dat de parameteraanpassingen niet erg groot zijn. Dit komt overeen met het feit dat tijdens de optimalisatie grote parameteraanpassingen ontoelaatbaar werden geacht en door de modelleur onmogelijk zijn gemaakt.

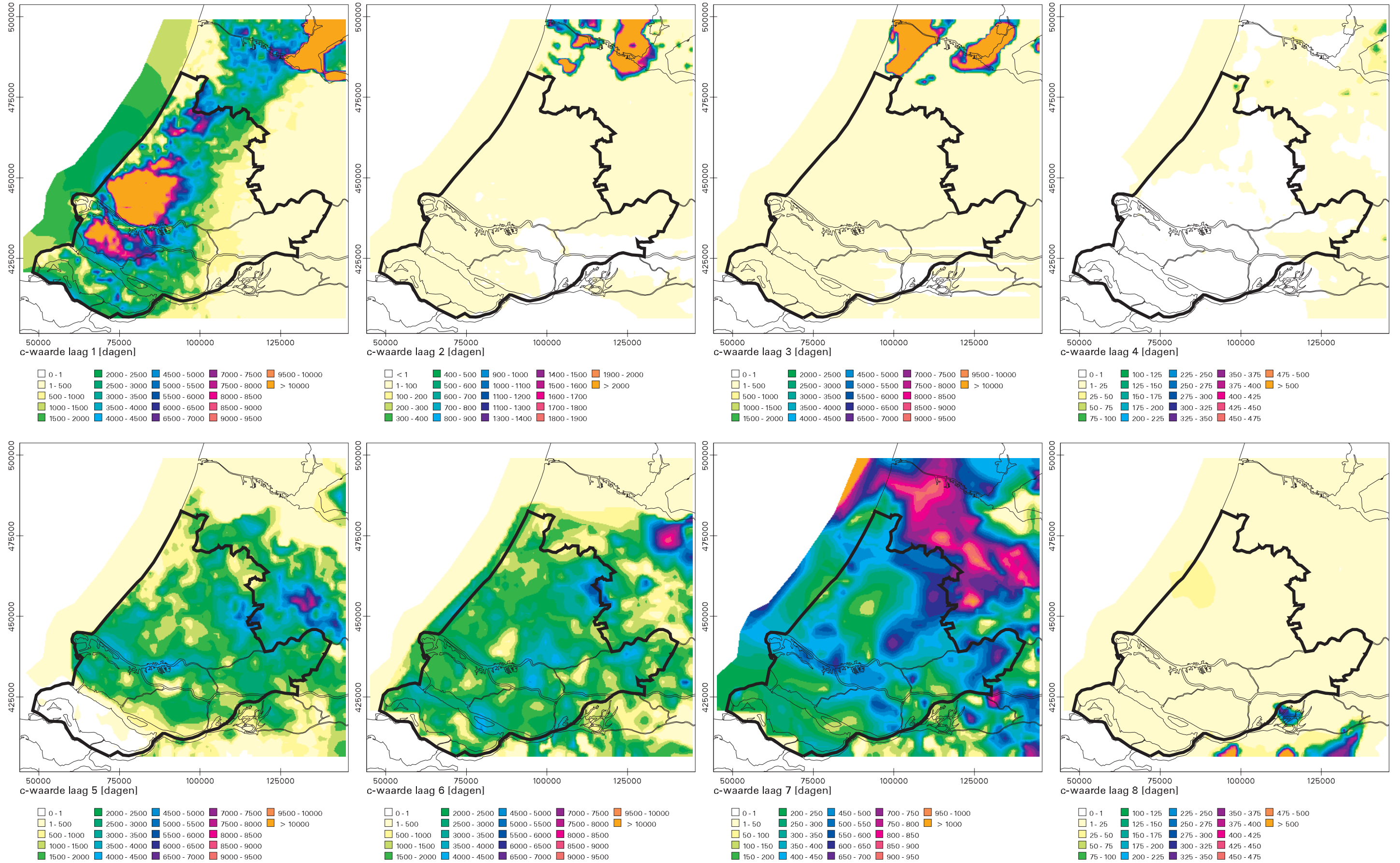
Er dient hier nogmaals te worden opgemerkt dat de resulterende parameterwaarden het resultaat zijn van een concurrentie tussen metingen van grondwaterstanden en zoetwaterstijghoogten enerzijds, en aanpassing van *kD*- en *c*-waarden anderzijds. Bij de bovenbeschreven ijking is impliciet relatief veel gewicht gegeven aan de grondwaterstand- en stijghoogtemetingen, maar werd een grote aanpassing in *kD*- en/of *c*-waarden ontoelaatbaar geacht. In essentie wordt bij de ijking de informatie over de

kD- en c-waarden die in de grondwaterstandmeting verborgen zit er zoveel mogelijk 'uitgeknepen'.

Daarnaast geldt dat de gebruikte metingen niet allemaal even zwaar zijn meegewogen in de parameteroptimalisatie. Het gewicht van de meting is afhankelijk van de factoren genoemd in paragraaf 4.1.1. Afhankelijk van de betrouwbaarheid van de meetreeks, is het gewicht (lees: de belangrijkheid) van de meting gevarieerd. Dit betekent dat voor minder betrouwbare metingen de eerder genoemde 'treksterkte' kleiner is. Het gevolg kan zijn dat voor deze meetpunten een relatief grote afwijking tussen gemeten en berekende grondwaterstanden optreedt. Deze relatief grote afwijking is dan gerechtvaardigd, omdat aan de betreffende meetreeksen minder waarde wordt toegekend.



Figuur 12 - Geoptimaliseerde kD-waarden



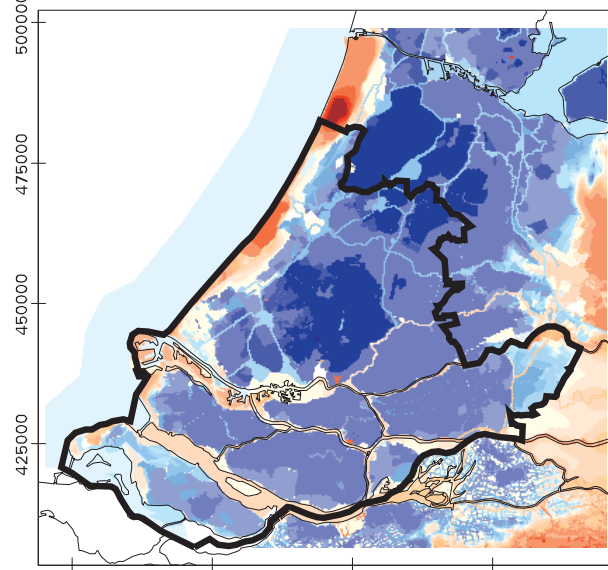
Figuur 13 - Geoptimaliseerde c-waarden

#### 4.5.3 *Berekende zoetwaterstijghoogten*

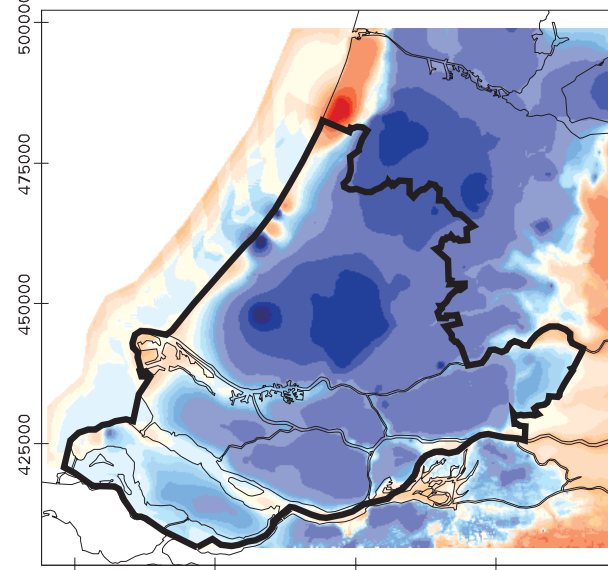
Het zoetwaterstijghoogtepatroon op verschillende diepten is te zien in figuur 14. Ruimtelijk gezien bevinden zich twee laaggelegen poldergebieden in het onderzoeksgebied: de Haarlemmermeerpolder inclusief het gebied rond de Polder Groot-Mijdrecht en het poldergebied rondom Polder de Zuidplas en de Prins Alexander Polder. Tevens zijn enkele grote grondwateronttrekkingen duidelijk te herkennen, bijvoorbeeld nabij Delft in het eerste watervoerende pakket met lokaal zoetwaterstijghoogten van bijna -8.5 m N.A.P. In de duingebieden van Waterleidingbedrijf Amsterdam en Duinwaterbedrijf Zuid-Holland is de opbolling van de zoetwaterstijghoogte duidelijk zichtbaar. Verder zijn de Utrechtse Heuvelrug aan de oostelijke rand en Noord-Brabant aan de zuid-oostelijke rand van het model karakteristiek aanwezig.

#### 4.5.4 *Berekende fluxen*

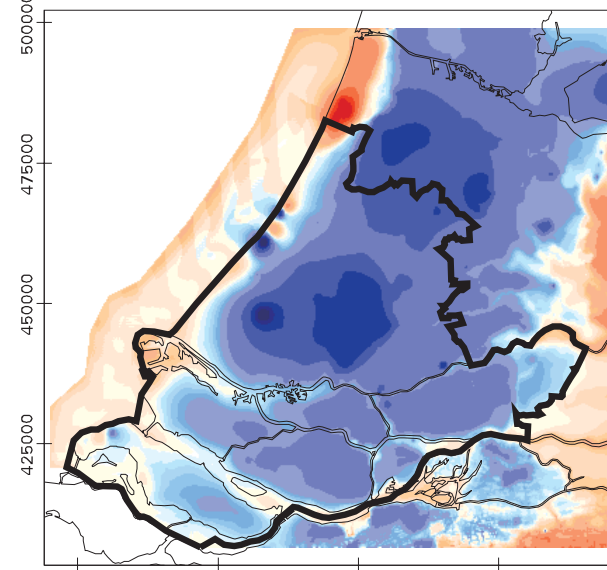
In figuur 15 zijn de fluxen (mm/dag) tussen de modellen 1 en 2 weergegeven. Blauwe tinten geven een opwaartse flux weer, rode tinten een neerwaartse flux. De figuur toont de kwel en infiltratie aan de onderkant van de deklaag: sterke kwel in de Haarlemmermeer polder en polder Groot-Mijdrecht, infiltratie in Delft door onttrekking van DSM nabij Delft. Ook hooggelegen rivieren en boezemwateren zijn duidelijk herkenbaar. Mooi zijn de abrupte overgangen tussen van laaggelegen (polder)gebieden met sterke kwel in het blauw en direct daarnaast de hooggelegen waterplassen met sterke infiltratie in het rood. Deze patronen, die lijken op de zogenaamde ‘dijkse kwel’, zijn eigenlijk overal terug te zien, of het nu polders en waterplassen of hoge rivieren en aanliggend land betreft. In de duingebieden is de infiltratie van oppervlaktewater, al dan niet kunstmatig opgelegd, goed zichtbaar.



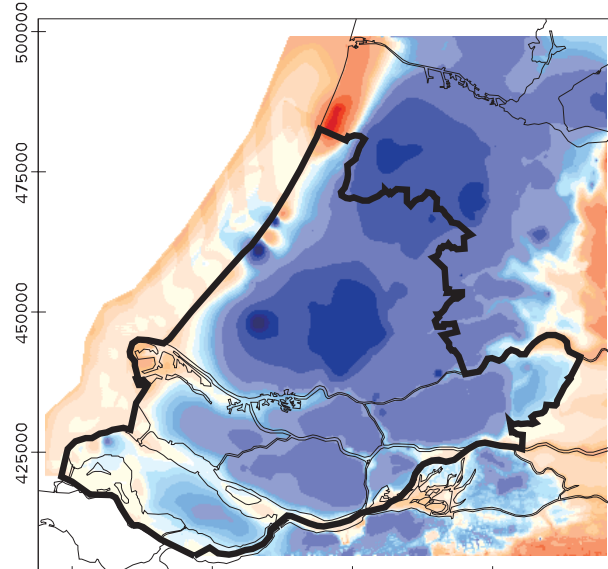
Berekende stijghoogten laag 1 na ijking [m]



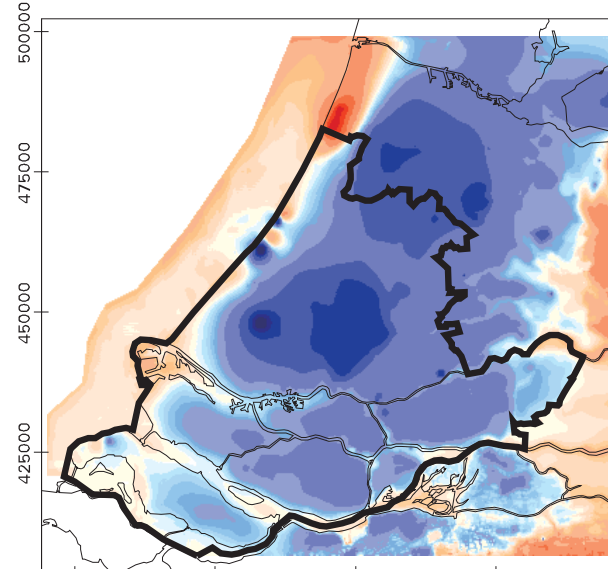
Berekende stijghoogten laag 2 na ijking



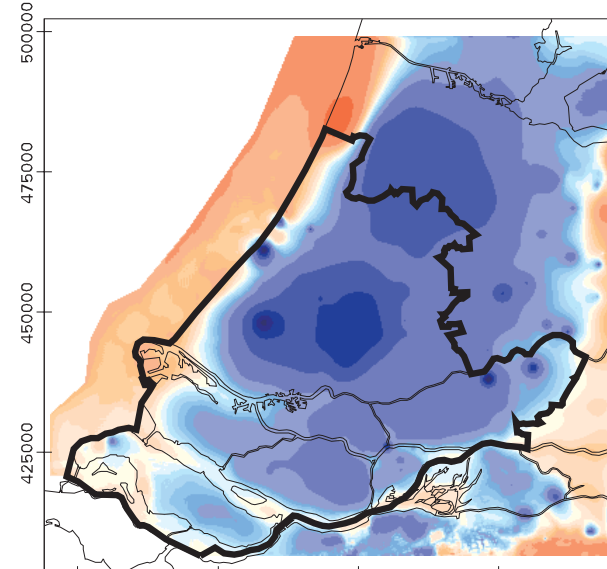
Berekende stijghoogten laag 3 na ijking



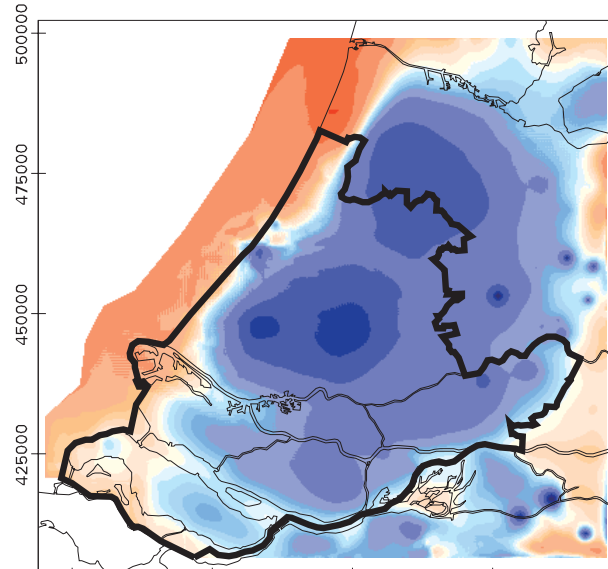
Berekende stijghoogten laag 4 na ijking



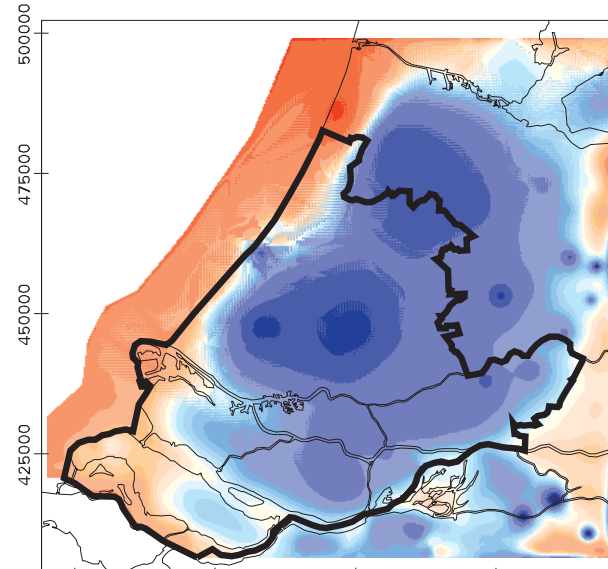
Berekende stijghoogten laag 5 na ijking



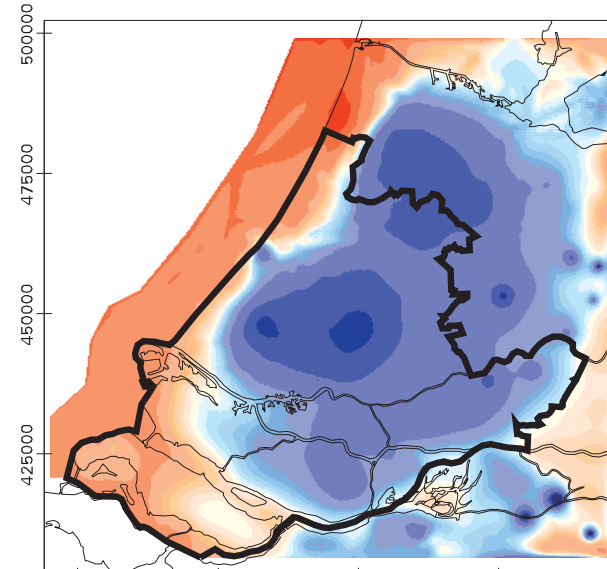
Berekende stijghoogten laag 6 na ijking



Berekende stijghoogten laag 7 na ijking

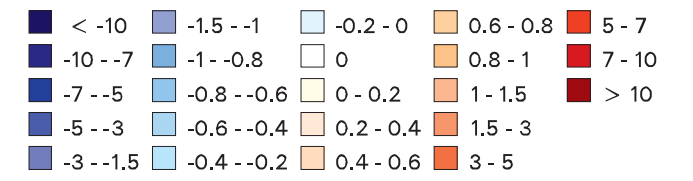


Berekende stijghoogten laag 8 na ijking

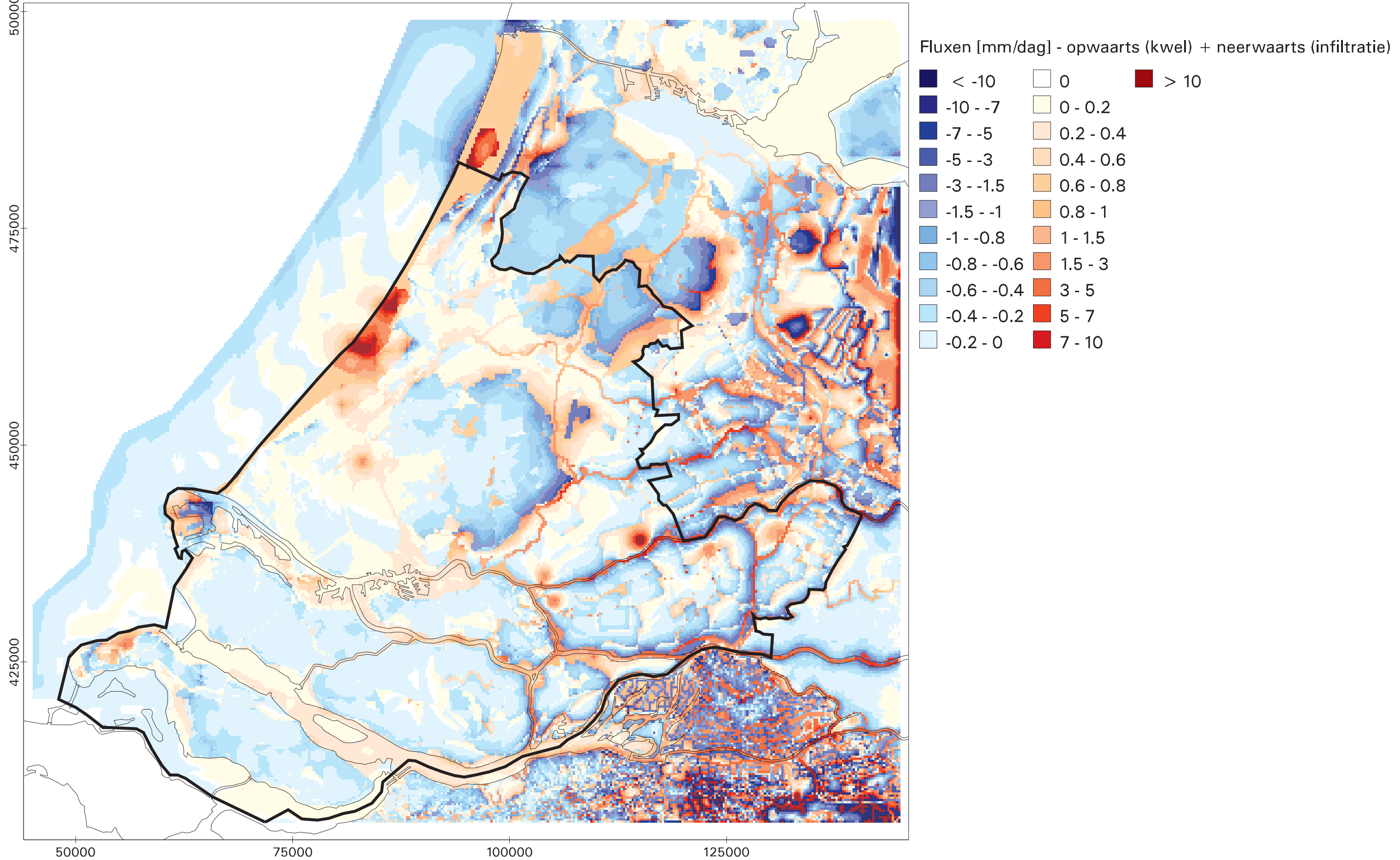


Berekende stijghoogten laag 9 na ijking

meter t.o.v. NAP



Figuur 14 - Berekende zoetwaterstijghoogten [m N.A.P.] per modellaag



Figuur 15 - Berekende fluxen [mm/d] van en naar het top-systeem: rood = infiltratie, blauw = kwel.

## 5 Opbouw stoftransportmodel

### 5.1 Inleiding

De geoptimaliseerde kD- en c-waarden zijn de uitgangswaarden voor het stoftransportmodel. Met MOCDENS3D wordt de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater in de watervoerende en slecht doorlatende lagen berekend. Het model is gericht op het in beeld brengen van veranderingen in de ruimtelijke verdeling ten gevolge van zeespiegelstijging en bodemdaling van grondwaterstijghoogten, waterbalansen (kwel en infiltratie) en zoutbelasting naar het oppervlaktewater.

Omdat de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater over het algemeen zeer traag verloopt, kan met een stationair grondwatermodel gewerkt worden. Dat wil zeggen, in dit model wordt voor elke tijdstap van één jaar de grondwaterstandsvergelijking stationair uitgerekend, de bergingscoëfficiënt is gelijk aan nul. Veranderingen in de dichtheid ten gevolge van stoftransport worden daarbij meegenomen.

In het geval van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming wordt gerekend met zogenaamde zoetwaterstijghoogten (paragraaf 4.1.1). Vrij vertaald zijn dit in de buis gemeten stijghoogten die worden gecorrigeerd voor dichtheidsverschillen. Ter indicatie: als zich in een observatie buis zout water bevindt dan is per 10 m waterkolom de zoetwaterstijghoogte 0.25 m hoger dan de gemeten stijghoogte.

### 5.2 Horizontale modelschematisatie

De horizontale modelschematisatie blijft voor het stoftransportmodel ongewijzigd. Het modelgebied beslaat een oppervlak van 925000 hectare: het gehele beheergebied van de Provincie Zuid-Holland inclusief delen van aangrenzende provincies. Het modelnetwerk is zodanig gekozen dat dit ruim overeenstemt met een relevante hydrologische begrenzing. Hierdoor zal het effect van randvoorwaarden op de grondwaterstroming alsmede op de verandering in de zoet-zoutverdeling in het onderzoeksgebied beperkt blijven gedurende de te simuleren periode van twee eeuwen.

### 5.3 Verticale modelschematisatie

Uitgaande van de gehanteerde methodieken voor de berekening van stoftransport, dient het onderzoeksgebied opgedeeld te worden in gridcellen, waarbinnen alle eigenschappen uniform worden verondersteld. Daarom wordt voor het stoftransportmodel de ondergrond geschematiseerd in veertig horizontale lagen. De onderste twintig hebben een dikte van 10 meter, de bovenste twintig hebben een dikte van 5m. Watervoerende pakketten en scheidende lagen worden binnen deze modellagenstructuur onderverdeeld.

Het stoftransportmodel bestaat uit 5.920.000 cellen van 250 bij 250 meter, verdeeld over 370 rijen, 400 kolommen en 40 lagen. Om de variatie in de verticaal van concentraties en dichtheid nauwkeurig mee te nemen is gekozen voor een groot aantal lagen. Als gevolg hiervan kunnen verschijnselen als een zoet-zoutinversie of een



overgangszone van zoet naar zout grondwater in één watervoerend pakket adequaat worden meegenomen.

## 5.4 Gegevensperiode

In het stationaire model zijn voor tijdsafhankelijke variabelen (peilen, dichtheid van het grondwater, grondwateraanvulling en onttrekkingen) gemiddelde waarden toegekend. Gegevens zijn verzameld en gemiddeld over de periode 1993 tot en met 2002.

Zoetwaterstijghoogten worden per gridcel stationair berekend. Dat wil zeggen, dat binnen een tijdstap van 1 jaar de zoetwaterstijghoogte wordt verondersteld constant te zijn. De dichtheid verandert tijdens de simulatie. Aan het eind van elke tijdstap van 1 jaar, wordt de dichtheid gebruikt om de zoetwaterstijghoogte opnieuw uit te rekenen.

Het transport van zout wordt niet-stationair gemodelleerd met behulp van deeltjes (initieel 8 per gridcel). Het convergentie-criterium voor de grondwaterstromingsvergelijking (zoetwaterstijghoogte) is voor het stoftransportmodel gelijk aan 0.001 m (een parameter-gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd waarbij deze waarde van 0.001 m nauwkeurig genoeg bleek). De lengte van de tijdstap om de vergelijking van de stroming van grondwater opnieuw op te lossen is gelijk aan 1 jaar. Het model zal worden doorgerekend vanaf 2000 tot en met het jaar 2200.

## 5.5 Parametrisatie

### 5.5.1 Zij- en bovenrandvoorwaarden

De bovenrandvoorwaarden zijn uit het stromingsmodel overgenomen. Aan de bovenrand en de zijranden van het model geldt een zogenaamde Cauchy (gemengde) randvoorwaarde. Dit betekent dat het model op deze randen een peil – weerstand relatie bevat. Met behulp van een ‘General Head Boundary package worden initiële peilen opgegeven. Voor de bovenrand zijn deze peilen o.a. gebaseerd op gegevens van de bestaande peilvakken (gemiddelde waarde van zomer- en winterhalfjaar). Een gedetailleerde beschrijving van de invulling van de peilen is opgenomen in Bijlage A.

Aan de zijranden verlopen de peilen hydrostatisch met de diepte. Aan de bovenrand is voor de weerstand een hoge conductiviteit opgegeven van 1000 m<sup>2</sup>/dag, naar de diepte neemt deze af tot 2 m<sup>2</sup>/dag.

Naast een peil wordt in de GHB-package zowel voor de boven- als ook voor de zijranden ook een chlorideconcentratie opgegeven voor het water dat over de rand het model zal binnenstromen. Deze concentraties zijn afkomstig uit de eerder beschreven driedimensionale dichtheidsinterpolatie (paragraaf 3.4.2.).

### 5.5.2 *Initiële dichtheidsverdeling*

Fouten in de bepaling van de dichtheid worden gemakkelijk geïntroduceerd, zeker op grotere diepten waar het aantal waarnemingen over het algemeen beperkt is. Slechts 10% van de metingen ligt dieper dan -100m N.A.P (paragraaf 3.4.2). Zo kunnen (numerieke) inversies van zoet en zout grondwater gemakkelijk ingevoerd worden, terwijl die in werkelijkheid niet bestaan. Onjuiste inversie in de dichtheid beïnvloeden direct de grondwaterstroming (aangezien stofconcentraties en grondwaterstroming aan elkaar gekoppeld zijn). In eerste instantie lijkt een gegenereerd dichtheidsveld visueel misschien wel in orde, tijdens analyse van de eerste niet-stationaire resultaten (en dan met name de grondwatersnelheden) vallen de onjuiste inversies direct op. Zulke fouten uitend zich bijvoorbeeld in zones van het grondwatersysteem waar de grondwatersnelheid in verticale richting onrealistisch sterk fluctueert, enkel en alleen doordat een verkeerde dichtheid uit de 3D-interpolatie van de metingen is ingevoerd in het numerieke model. Deze kunstmatige grondwaterstromingen kunnen dominant zijn en de werkelijke grondwaterstroming overtreffen.

Op basis van kennis over het grondwatersysteem (hydrogeologische en geochemische situatie) dient derhalve de 3D-dichtheidverdeling na interpolatie te worden aangepast alvorens er verziltingsberekeningen mee uitgevoerd kunnen worden. In eerste instantie wordt het model gecontroleerd op numerieke instabiliteiten aan de hand van het snelheidsveld. Hiermee wordt de aandacht gericht op zones waar zich de grootste numerieke zoet-zout inversies bevinden, alwaar deze handmatig worden gecorrigeerd. In het kustgebied, waar zoet waterlenzen op het zoute grondwater liggen is sprake van een scherpe overgang van zoet naar zout grondwater. Hier is de initiële dichtheidsverdeling onnauwkeurig. Daarom is naast de handmatige correctie tevens een automatische correctie uitgevoerd, waardoor de dichtheidsverdeling lokaal wordt gladgestreken. Daarna worden ook numerieke instabiliteiten verwijderd door gedurende een korte tijd het onderhavige systeem zeer nauwkeurig door te rekenen en daarbij een grote (onrealistische) moleculaire diffusie te hanteren. Het resultaat is een driedimensionaal dichtheidsveld waar de grootste numerieke instabiliteit uit verdwenen is.

### 5.5.3 *Onttrekkingen en brijnlozingen*

De WELL-package van het stoftransport model bevat naast debieten ook concentraties. Deze zijn vooral van belang in het geval van brijnlozingen. Brijnlozingen zijn lozingen van verzilt gietwater uit de glastuinbouw en boomteeltsector. Tuinders onttrekken gietwater uit het eerste watervoerende pakket en injecteren het resterende brijn (na 50% ontzilting in bovengrondse ontziltingsinstallaties) bovenin het tweede watervoerende pakket. Het woord 'brijn' lijkt zeer hoge chloridegehalten te suggereren. Daar is in dit geval geen sprake van. De chlorideconcentratie van de brijnlozingen is over het algemeen niet hoger dan enkele duizenden milligrammen chloride per liter. De ingevoerde brijnlozingen en bijbehorende onttrekkingen zijn weergegeven in Bijlage C.

Daarnaast kan het gebeuren dat grote onttrekkingen in het stoftransportmodel zorgen voor te grote transportsnelheden. Om hiervoor te corrigeren zijn de grootste onttrekkingen binnen een modellaag verdeeld over meerdere cellen.

## 5.6 Resultaten huidige situatie

### 5.6.1 Huidige zoetwatervoorraad

Voor de huidige situatie is het volume van de huidige zoetwatervoorraad bepaald aan de hand van modelcellen met een concentratie kleiner dan 150 mg/l. Het volume zoetwater per gridcel wordt bepaald door het aantal lagen in de vertikaal dat zoetwater bevat, vermenigvuldigd met het cel volume (hoogte x 250 x250) en met de porositeit (30%).

Door de provincie Zuid-Holland wordt de ondergrond verdeeld in 5 watervoerende pakketten, deze indeling is anders dan de eerder beschreven modelschematisatie (tabel 1, hoofdstuk 3). De resultaten hieronder worden gepresenteerd op basis van de door de provincie gehanteerde watervoerende pakketten. Hieronder volgt de indeling in 5 watervoerende pakketten zoals gedefinieerd door de provincie.

Tabel 4 Geohydrologische indeling, zoals gehanteerd door de provincie Zuid-Holland

Watervoerend pakket	Beschrijving	Overeenkomstige modellagen grondwater-Stromingsmodel (hoofdstuk 3)
1	Watervoerende lagen binnen de deklaag	1
2	Watervoerende lagen tussen de deklaag en de formatie van Kedichem	2 t/m 5
3	Watervoerende lagen tussen de formatie van Kedichem en de formatie van Tegelen	6
4	Watervoerende lagen tussen de formatie van Tegelen en de formatie van Maassluis	7
5	Watervoerende lagen tussen de formatie van Maassluis en de formatie van Oosterhout	8 en 9

De huidige zoetwatervoorraad is weergegeven in figuur 16. De zoetwatervoorraad bevindt zich vooral in het oosten van de provincie. De zoetwatervoorraad is per watervoerend pakket weergegeven in tabel 5. In totaal is binnen de grenzen van de provincie Zuid-Holland bijna 27 miljard kubieke meter zoet water aanwezig. Het gaat hierbij om de totale hoeveelheid zoetwater in alle, in de ondergrond aanwezige, watervoerende pakketten en scheidende lagen.

Tabel 5 Huidige zoetwatervoorraad (chloridegehalte < 150 mg/l) binnen de provincie Zuid-Holland, per watervoerend pakket bij een porositeit van 30%.

Watervoerend pakket	Zoetwatervoorraad (m <sup>3</sup> )
2	8090 · 10 <sup>6</sup>
3	1769 · 10 <sup>6</sup>
4	1854 · 10 <sup>6</sup>
5	1442 · 10 <sup>6</sup>
Deklaag en overige scheidende lagen	13822 · 10 <sup>6</sup>
<b>Totaal</b>	<b>26980 · 10<sup>6</sup></b>

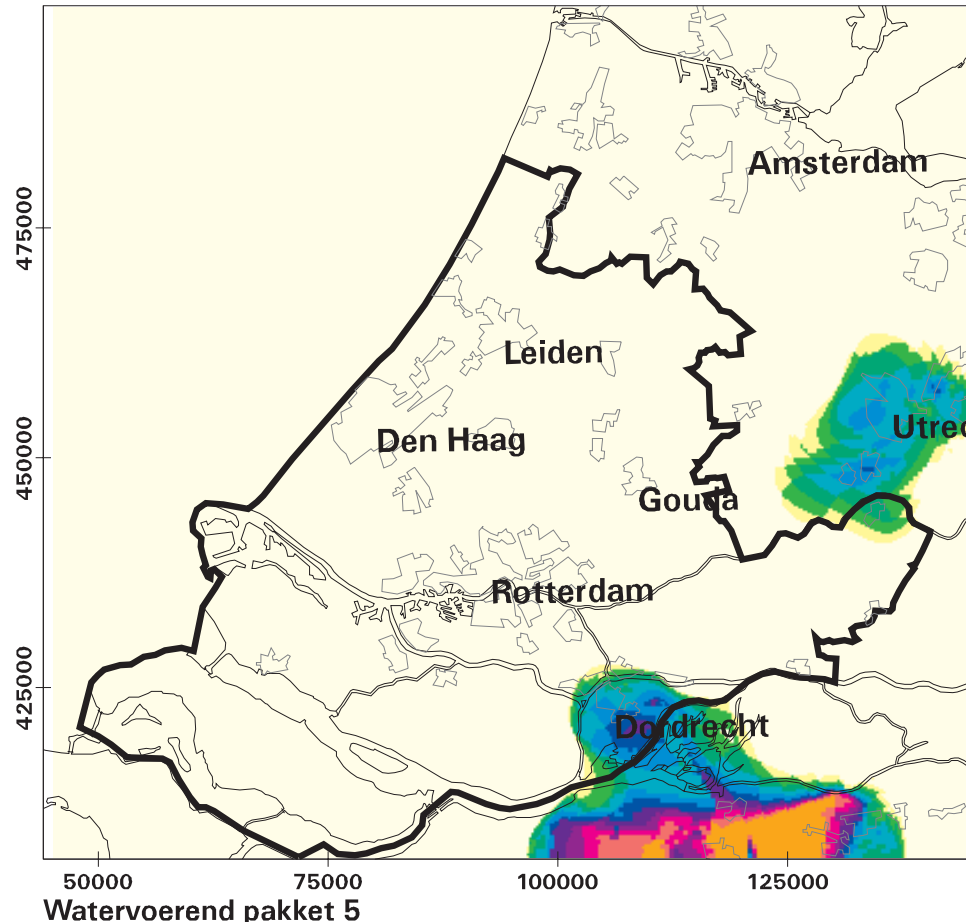
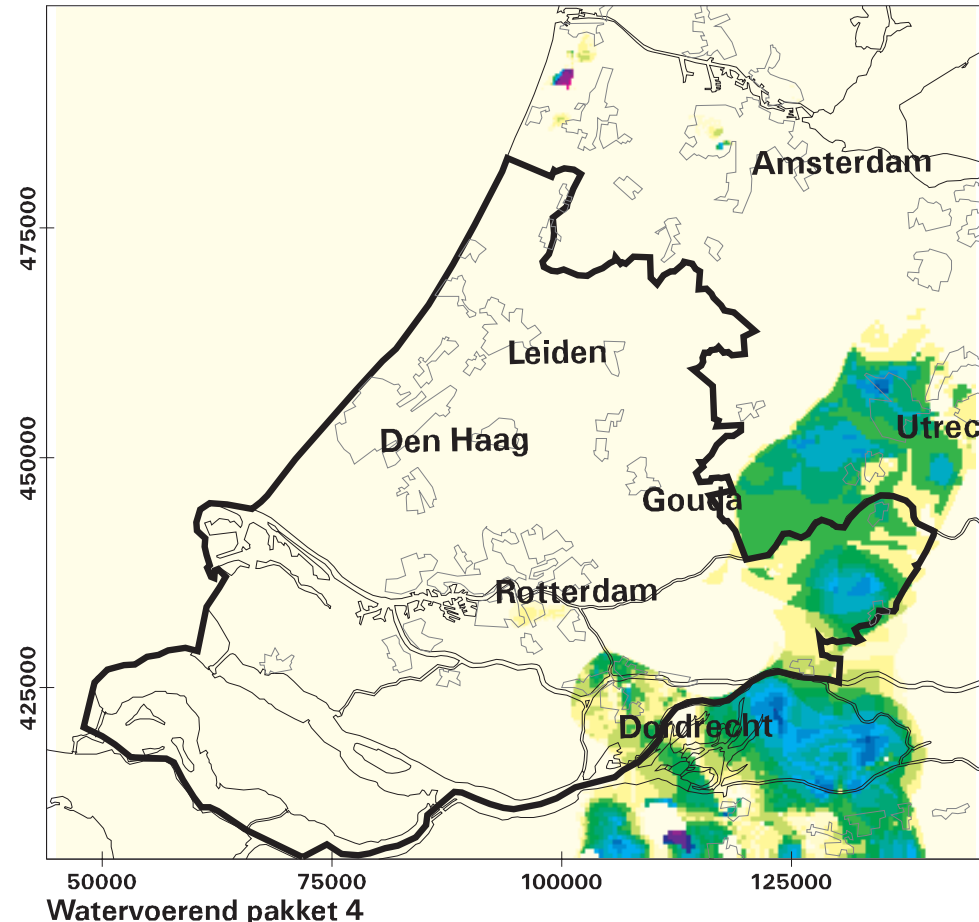
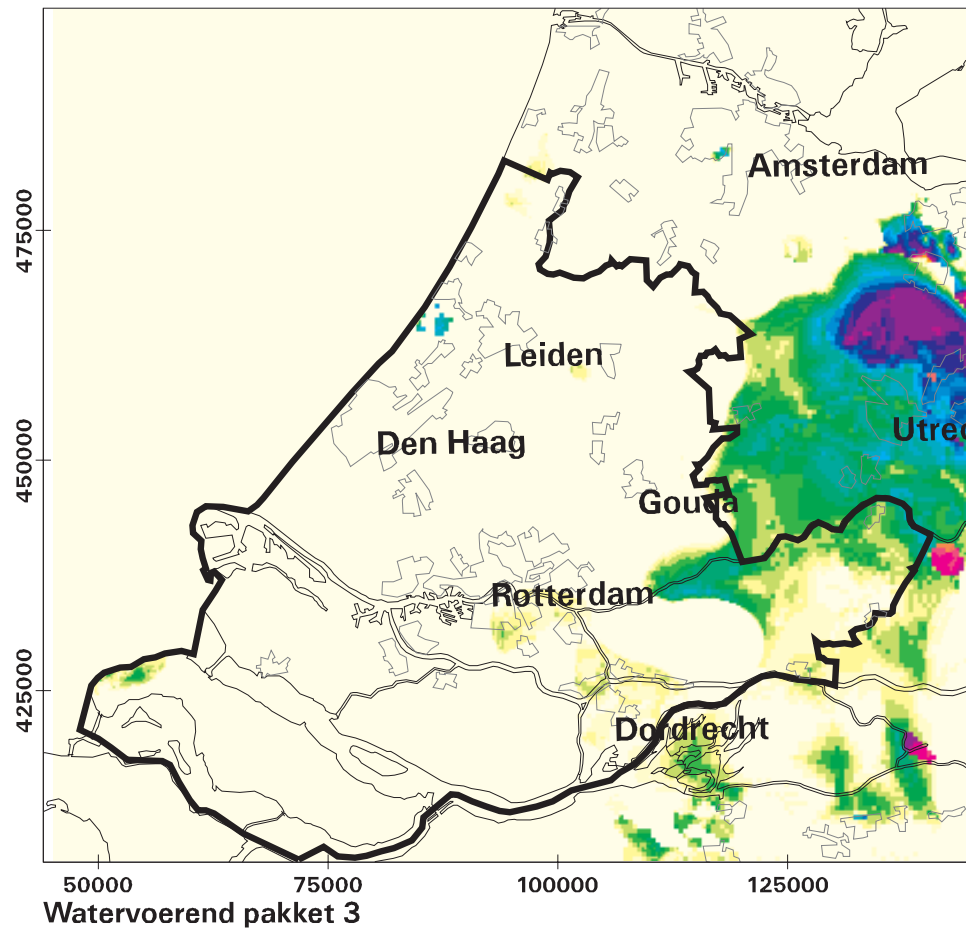
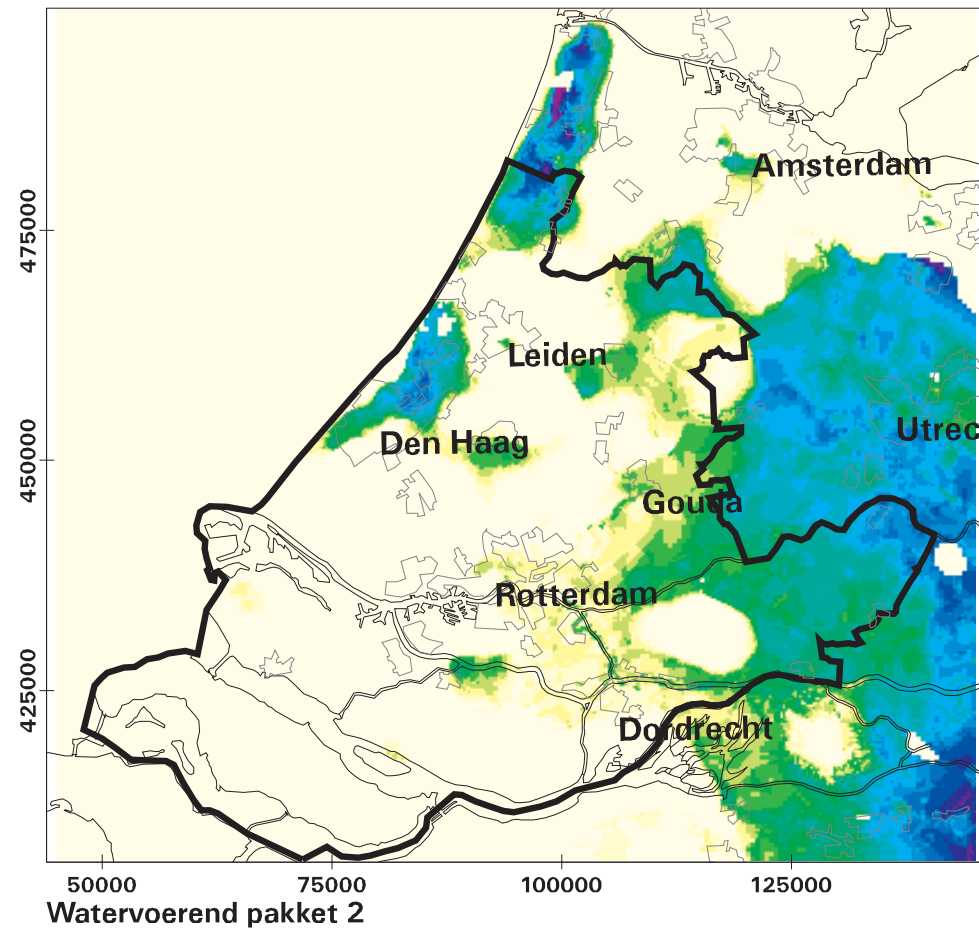
### 5.6.2 *Betrouwbaarheid resultaten*

Zoals beschreven in paragraaf 3.4.2, zijn zoveel mogelijk chloridemetingen gebruikt bij het bepalen van de initiële dichtheidsverdeling. Dit betekent dat ook oude metingen zijn gebruikt, omdat deze metingen bijdragen aan een betere ruimtelijke verdeling van de meetpunten en daarmee de betrouwbaarheid van de schatting van de initiële dichtheidsverdeling verhogen. Het aantal beschikbare metingen neemt af met de diepte (figuur 2). Slechts 10% van de metingen ligt dieper dan -100 m N.A.P. Het gevolg is, dat de initiële dichtheidsverdeling onderin het systeem minder nauwkeurig is dan bovenin. Juist op de grotere dieptes komt vaak brak en zout grondwater voor. Daar staat tegenover, dat het erg lang duurt voordat zoet grondwater is vervangen door brak en/of zout grondwater. De snelheid waarmee veranderingen optreden is laag, zo ook de snelheid van de veranderingen in de zoetwatervoorraad (in de orde van enkele procenten over 200 jaar). Verder ligt het zoete grondwater voornamelijk bovenin het grondwatersysteem, waarin de meeste metingen beschikbaar zijn.

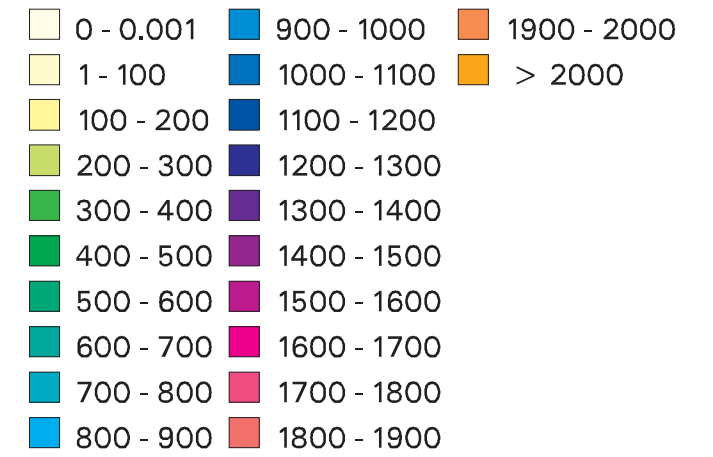
De berekening van de huidige zoetwatervoorraad is gebaseerd op 5772 chlorideconcentratie metingen (figuur 3).

Numerieke instabiliteiten zijn uit het model verwijderd: er is gecorrigeerd voor numerieke zoet-zout inversies, onnauwkeurigheden in de initiële dichtheidsverdeling op scherpe overgangen van zoet naar zout water zijn gladgestreken en het onderhavige systeem is gedurende een korte tijd zeer nauwkeurig doorgerekend, waarbij een grote moleculaire diffusie is gehanteerd.

Op basis van de huidige studie kan geen uitspraak gedaan worden over de absolute waarde van de nauwkeurigheid van de geïnterpoleerde chlorideverdeling wel kan worden gesteld dat deze ruimtelijk variabel is en o.a. afhankelijk van het aantal metingen waarop de interpolatie lokaal gebaseerd is. Zoals hierboven reeds opgemerkt is een maximale hoeveelheid metingen hiervoor benut.



x 1000 m<sup>3</sup> per gridcel van 250x250 meter



Figuur 16 - Huidige zoetwatervoorraad per watervoerend pakket [x 1000m<sup>3</sup> per 250x250m]

## 6 Scenarioberekeningen

### 6.1 Scenario's

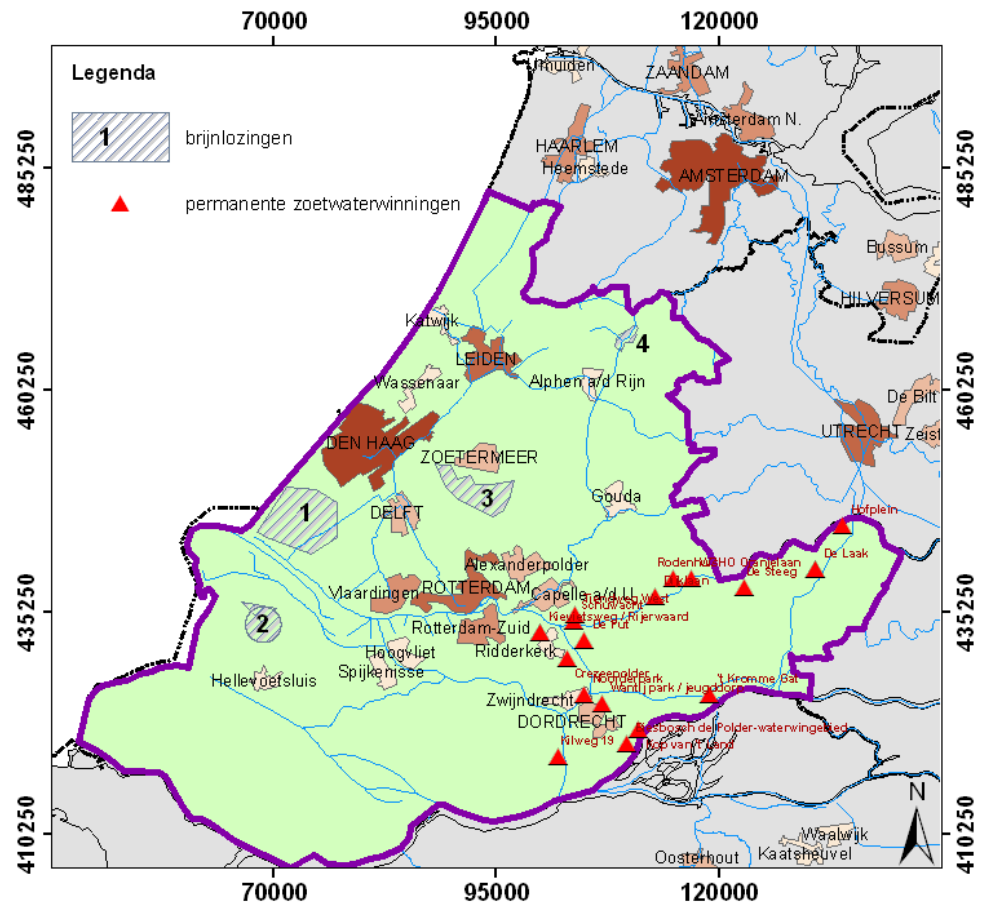
In deze studie zijn drie verschillende scenario's doorgerekend. De scenario's zijn gebaseerd op drie onttrekkingssituaties:

- I. huidige onttrekkingssituatie wordt gehandhaafd: alle geregistreerde (bij de provincie) permanente grondwateronttrekkingen en brijnlozingen blijven in werking;
- II. situatie inclusief brijnlozingen, zonder permanente zoetwateronttrekkingen (uitzetten van de onttrekkingen van drinkwatermaatschappij Hydron en van Waterbedrijf Europoort);
- III. situatie met alle geregistreerde (bij de provincie) permanente grondwateronttrekkingen exclusief de brijnlozingen (en bijbehorende onttrekkingen).

De zoetwateronttrekkingen zijn de grote onttrekkingen van drinkwatermaatschappij Hydron en van waterbedrijf Europoort (figuur 17).

De brijnlozingen zijn geconcentreerd in 4 gebieden (figuur 17):

1. Het Westland (520 lozers, onttrekkingsdebiet per tuinder gemiddeld 10.000 m<sup>3</sup>/jaar, lozingsdebiet 5.000 m<sup>3</sup>/jaar);
2. Het gebied tussen Tinte, Brielle en Oostvoorne (40 lozers, onttrekkingsdebiet per tuinder gemiddeld 50.000 m<sup>3</sup>/jaar, lozingsdebiet 25.000 m<sup>3</sup>/jaar);
3. Het gebied tussen Pijnacker, Bergschenhoek, Berkel-Rodenrijs, Bleiswijk en de A12 (200 lozers, onttrekkingsdebiet per tuinder gemiddeld 30.000 m<sup>3</sup>/jaar, lozingsdebiet 15.000 m<sup>3</sup>/jaar);
4. Het gebied tussen ter Aar en Nieuwveen langs het Aarkanaal (40 lozers, onttrekkingsdebiet per tuinder gemiddeld 20.000 m<sup>3</sup>/jaar, lozingsdebiet 10.000 m<sup>3</sup>/jaar).



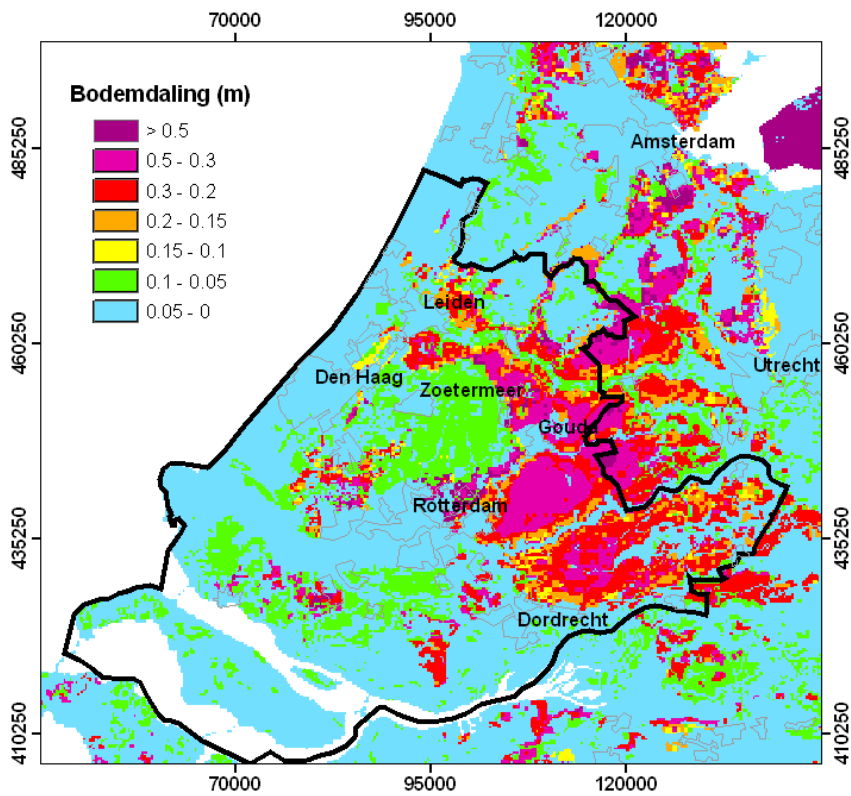
Figuur 17 – Locaties van de brijnlozingen en de permanente zoetwateronttrekkingen van drinkwatermaatschappij Hydron en van waterbedrijf Europoort.

De scenarioberekeningen betreffen het doorrekenen van de drie bovengenoemde onttrekkingssituaties, aangevuld met bodemdaling en zeespiegelstijging, voor een periode van 200 jaar.

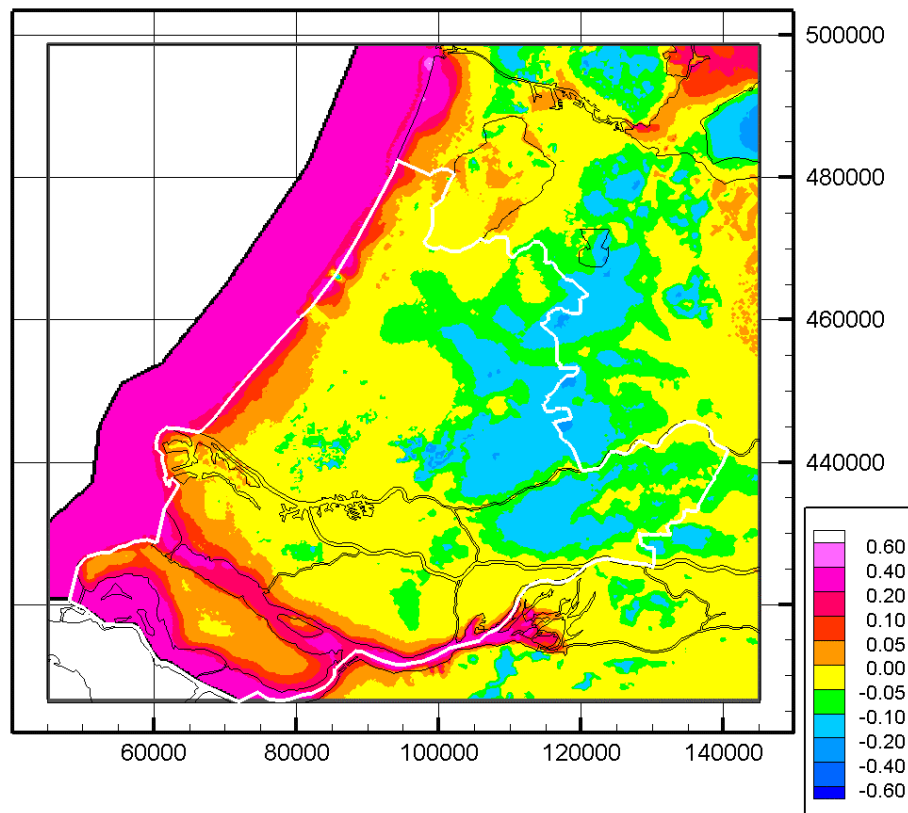
Er is gebruik gemaakt van prognoses voor bodemdaling afkomstig van het RIZA (figuur 18). De prognoses voor zeespiegelstijging zijn afkomstig van de provincie Zuid-Holland. Er wordt uitgegaan van het middenscenario, zoals gesteld in WB21. Dit betekent een absolute zeespiegelstijging op de Noordzee van 50 cm in 2100 [ 0.5 cm per jaar].

## 6.2 Invloedsfeer

Figuur 19 toont de invloedsfeer van de zeespiegelstijging en de bodemdaling in het grondwatersysteem. Het effect van een zeespiegelstijging dempt snel uit, terwijl in het veenweidegebied de bodemdaling een regionale stijghoogteverlaging veroorzaakt. Er is aangenomen, dat in het geval van bodemdaling landbouwkundige wensen en daarmee waterhuishoudkundige instellingen, zoals ontwateringsdiepte en drooglegging, onveranderd blijven. Dit betekent, dat polderpeilen lokaal evenredig dalen met de bodem. Daling van de polderpeilen beïnvloedt tevens de stijghoogte. Deze gaat, gedempt door de weerstand van de Holocene deklaag, mee met het polderpeil.



Figuur 18 – Gehanteerde bodemdalingprognose [m] in 2100 t.o.v. 2000 (bron: RIZA).



Figuur 19 - Invloedsfeer van een zeespiegelstijging en bodemdaling: verschil stijghoogte [m] tussen 2000 en 2100 op een diepte van -12.5 m N.A.P.

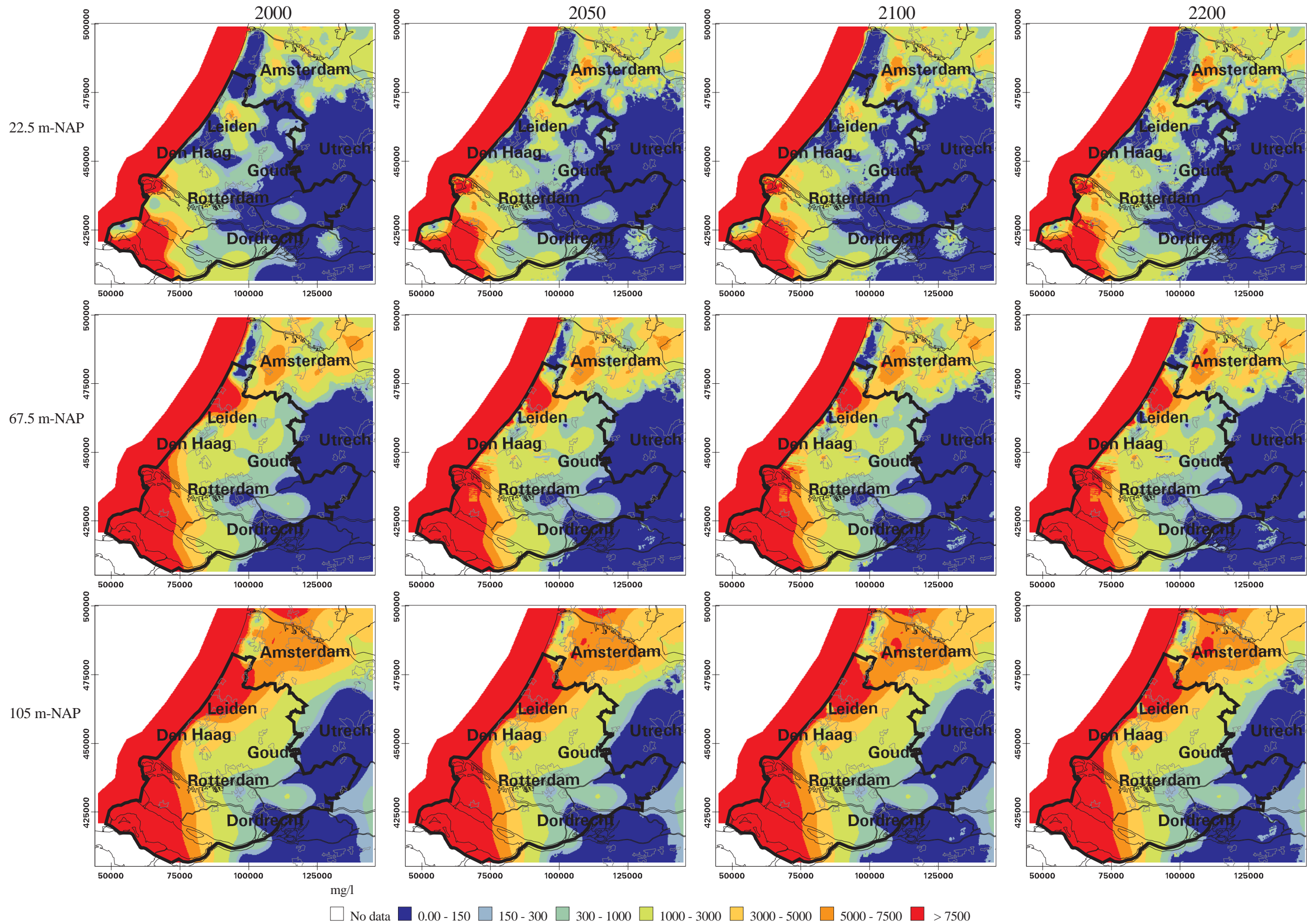


## 6.3 Resultaten

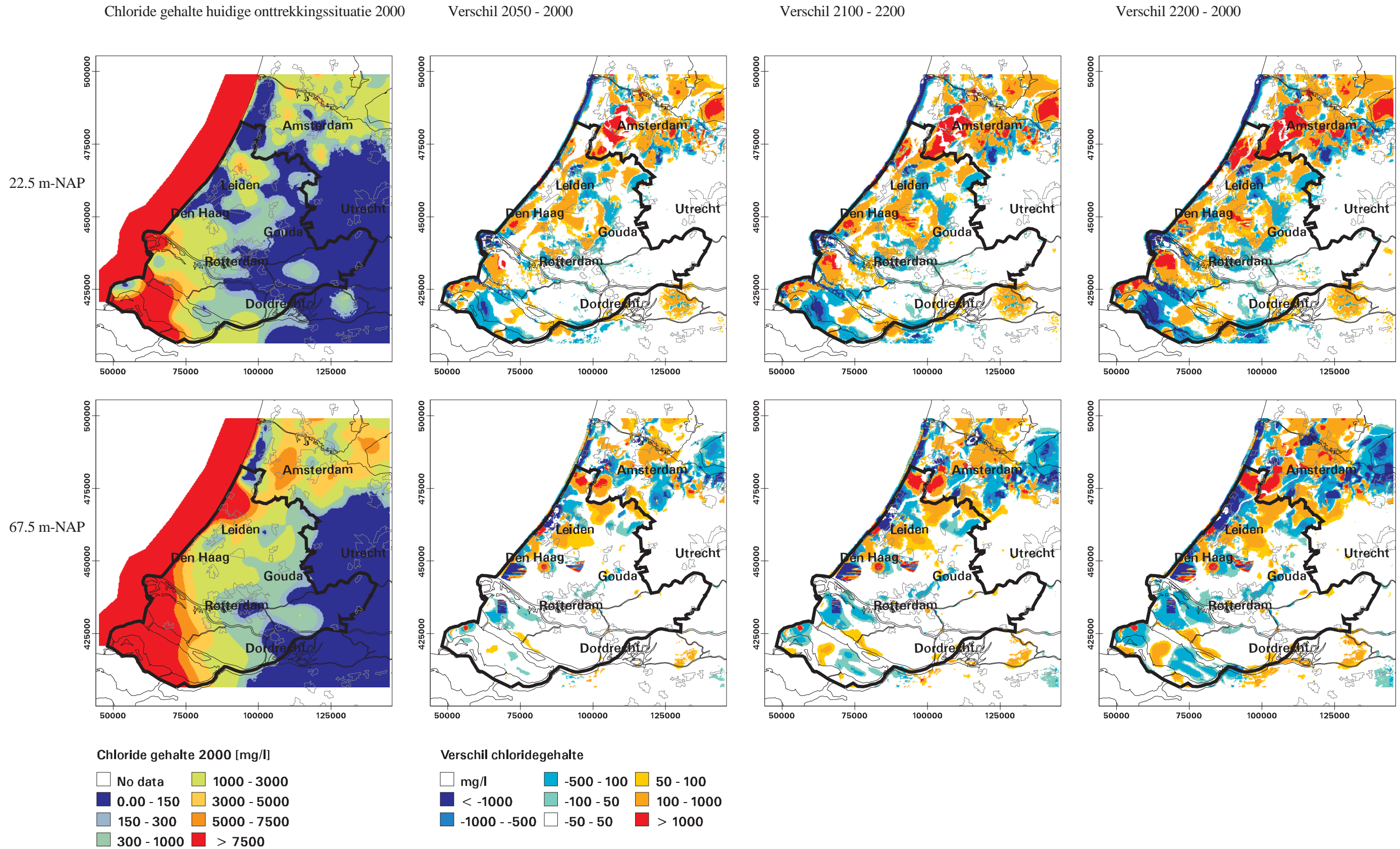
### 6.3.1 *Chloride concentraties*

Figuur 20 toont de resulterende chlorideconcentraties bij de huidige onttrekkingssituatie voor drie diepteniveaus voor de jaren 2000, 2050, 2100, en 2200. In deze figuur is te zien hoe de chlorideconcentraties verlopen, wanneer de huidige onttrekkingssituatie wordt gehandhaafd. De chloridegehalten zijn het hoogst in het westen van het gebied en nemen af richting het zuidoosten. Vooral de diepe polders van de Haarlemmermeer, Groot-Mijdrecht en de polders ten noorden van Leiden vertonen een verhoogd chloridegehalte ten opzichte van hun omgeving. Chloridegehalten nemen toe met de diepte en kunnen lokaal variëren onder invloed van grote drinkwaterwinningen, zoals in het zuidoosten van het modelgebied het geval is. Met name in de Haarlemmermeerpolder is over de periode van 200 jaar duidelijk een trend van verzilting te zien. Deze resultaten komen overeen met de huidige inzichten betreffende verdeling van het brakke en het zoute grondwater in het Nederlandse kustgebied (Post, 2004).

Om een beter inzicht te krijgen in de verschillen die optreden in de loop van de tijd, zijn in figuur 21 voor twee diepte niveaus (-22,5m NAP en -67,5m NAP) de verschillen weergegeven ten opzichte van het jaar 2000. Hierin is te zien dat, wanneer de huidige onttrekkingssituatie wordt gehandhaafd, vooral de diepe polders in Zuid-Holland zullen verzilten. Het veenweidegebied aan de randen van deze polders zal daarentegen licht verzoeten. Dit is het gevolg van infiltratie van zoet regenwater, welke plaatsvindt in de aangrenzende hoger gelegen boezems of aan de randen van de polders. Dit water stroomt de aangrenzende diepe polder in en treedt daar als zogenaamde ‘dijkse kwel’ weer uit.



Figuur 20 - Chlorideconcentratie [mg/l] op drie dieptes: huidige onttrekingsituatie (onttrekkingssituatie I)



Figuur 21 - Verandering chlorideconcentratie [mg/l] huidige onttrekkingsituatie ten opzichte van het jaar 2000 voor drie tijdstappen.

### 6.3.2 *Effect permanente zoetwateronttrekkingen en brijnlozingen*

Het effect van de onttrekkingsituaties II en III (resp. stopzetten van de permanente zoetwateronttrekkingen en van de brijnlozingen) is weergegeven na een simulatieperiode van 200 jaar (figuur 22). De verschillen met het huidige onttrekkingsregime zijn relatief klein.

Het stopzetten van de permanente zoetwateronttrekkingen heeft een klein effect op de waterkwaliteit (figuur 22), omdat de permanente zoetwateronttrekkingen zich in een omgeving met hoofdzakelijk zoet grondwater bevinden. Wanneer de winningen worden stopgezet treedt ter plaatse van de grote onttrekkingen een verzoeting op, doordat minder water met een hogere chlorideconcentratie wordt aangetrokken. De verschillen ten opzichte van de uitgangssituatie zijn in de orde van grootte van 100 mg/l.

De effecten over 200 jaar van het stopzetten van de brijnlozingen en de bijbehorende onttrekkingen in de provincie Zuid-Holland (onttrekkingsscenario III) zijn lokaal, gecentreerd rondom de gebieden waar de brijnlozingen zich bevinden. Het stopzetten van de brijnlozingen heeft zowel een verzoetend als een verziltend effect. Enerzijds treedt in het eerste watervoerend pakket verzoeting op als gevolg van het stopzetten van de brijnlozingenonttrekkingen. Dit komt doordat beregeningswater niet langer wordt onttrokken uit het eerste watervoerend pakket. Anderzijds heeft het stopzetten van de brijnlozingen tevens een lichte verzilting tot gevolg in het tweede watervoerend pakket, in het gedeelte dat het dichtst bij de kustlijn ligt. Dit is als volgt te verklaren. Momenteel is de situatie als volgt: Na gebruik wordt het gebruikte beregeningswater ontzilt. Vervolgens wordt het water geloosd in het tweede watervoerend pakket, de samenstelling is brak. Het chloridegehalte van het geïnjecteerde brijn is lager dan het chloridegehalte van het water in dit gedeelte van het watervoerende pakket. Door de injectie met brak water neemt het chloridegehalte in het tweede watervoerend pakket lokaal dus iets af. Wanneer de brijnlozingen worden stopgezet, verzilt het grondwater ter plaatse doordat de chlorideconcentraties niet langer kunstmatig laag worden gehouden. De effecten van het stopzetten van de brijnlozingen en de bijbehorende onttrekkingen zijn relatief klein ten opzichte van de heersende chloridegehalten in de omgeving. Verschillend met de uitgangssituatie (onttrekkingssituatie I) zijn in de orde van grootte van 150 mg/l.

### 6.3.3 *Effect op de kwelflux*

In figuur 23 is voor onttrekkingsituatie I de berekende kwelflux weergegeven. De figuur linksboven geeft de huidige kwel- en infiltratiefluxen (jaar 2000). Rode tinten betekenen infiltratie, opvallend zijn de infiltrerende boezemwaterlopen en infiltratie in het duingebied bij Katwijk en Den Haag. De blauwe kleuren geven kwelsituaties weer. Binnen de provincie Zuid-Holland zien we de Zuidplas polder ten westen van Gouda en de Zuid- en Noordeinderpolder ten oosten van Alphen aan de Rijn. Buiten de provincie zijn vooral de Haarlemmermeer polder, polder Groot Mijdrecht, de Horstermeerpolder en de Bethune polder ten Noorden van Utrecht duidelijk herkenbaar door een sterke kwelflux. Voor de daarop volgende jaren (2050, 2100 en 2200) is steeds de verandering afgebeeld ten opzichte van 2000. Oranje en gele kleuren betekenen een toename van de kwelflux of een afname van de infiltratieflux, groene kleuren betekenen een afname van de kwelflux of een toename van de infiltratieflux. Over de gesimuleerde periode van 200 jaar neemt de kwelflux in de gehele provincie Zuid-Holland gemiddeld met 22%

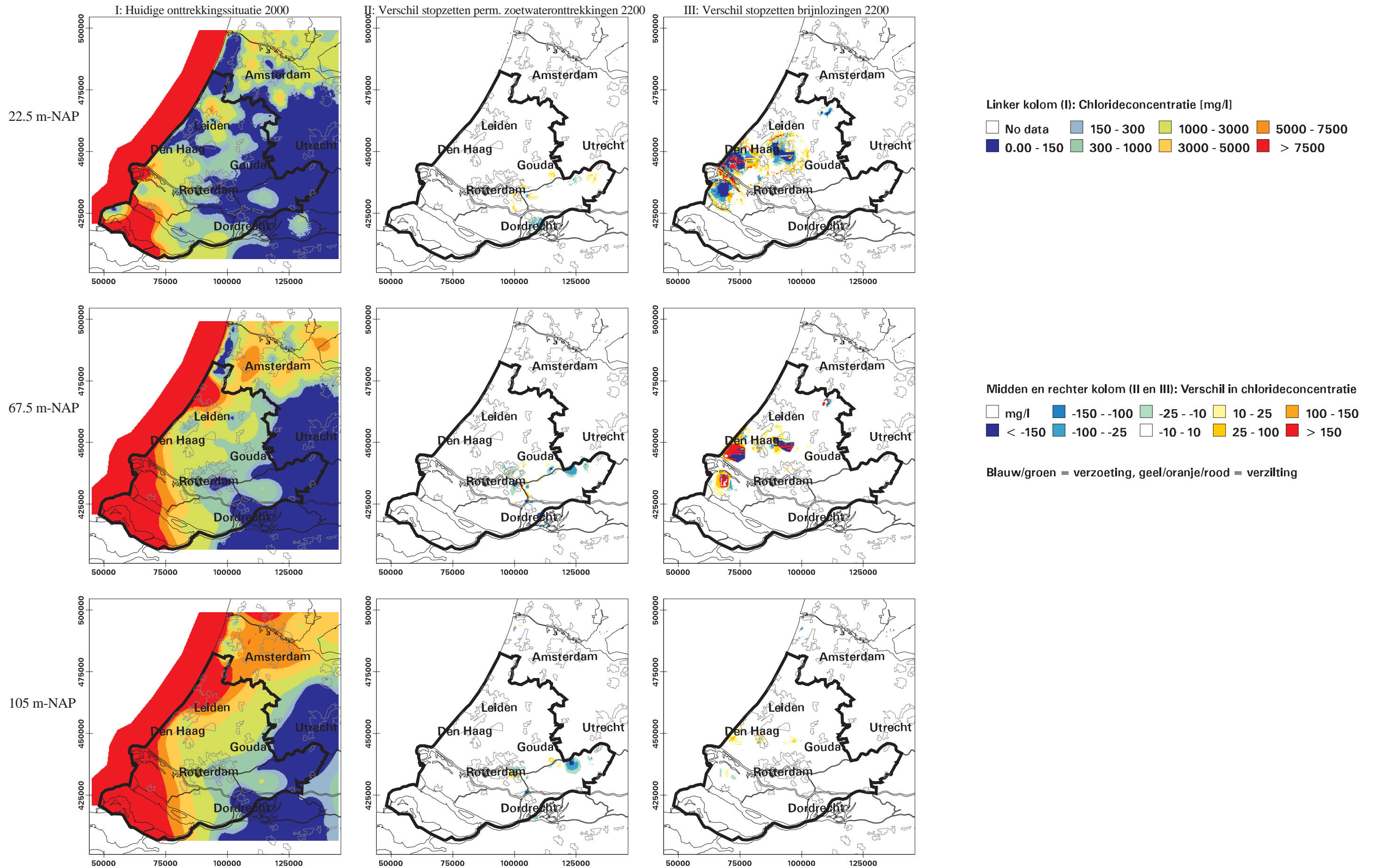
toe. Opvallend hierin is, dat de veranderingen een direct verband vertonen met de geprognosticeerde bodemdaling (figuur 18) en zeespiegelstijging. In de duinenrand is de invloed van de zeespiegelstijging merkbaar, hierdoor neemt de infiltratie af. De invloed van de zeespiegelstijging dempt snel uit en is op 10 km vanaf de kust nog nauwelijks merkbaar. In het oosten van het gebied en in het zuiden van Flevoland, waar de bodemdaling het sterkst is, neemt de kwelflux het meest toe. (maximale toename 1.8 mm/d na 200 jaar). Hier stijgt tevens de infiltratie vanuit de boezemwaterlopen. In de noordoost-zuidwest lopende stroom tussen Amsterdam en Rotterdam, waar nauwelijks bodemdaling optreedt en de invloed van de zeespiegelstijging is uitgedempt, verandert ook de kwel- en infiltratieflux niet of nauwelijks.

#### 6.3.4 *Effect op de zoutbelasting*

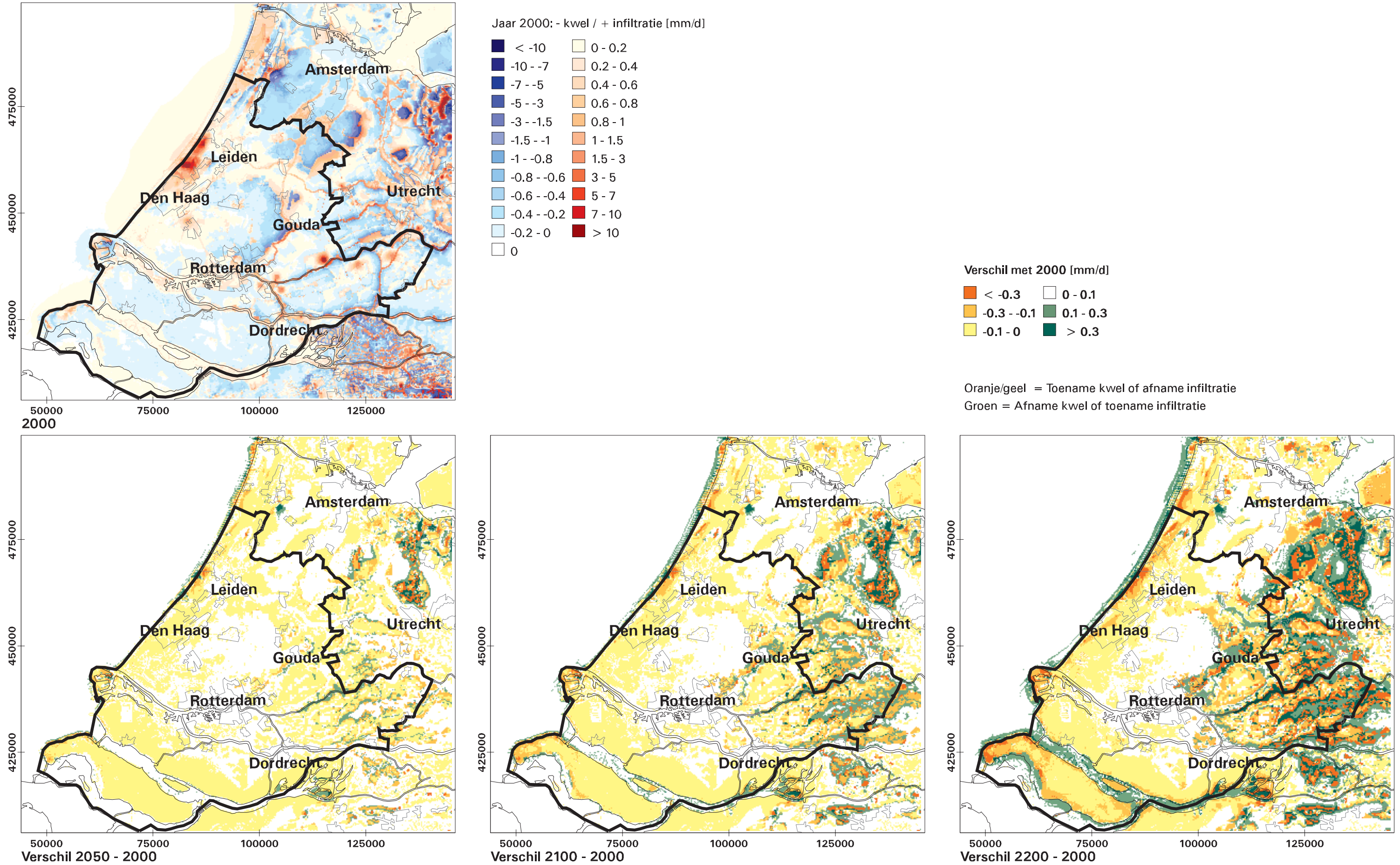
Figuur 24 toont voor onttrekkingssituatie I de zoutbelasting [kg/ha/jaar] op het topsysteem voor de jaren 2000, 2050, 2100, en 2200. De toename van de zoutbelasting in de gehele provincie Zuid-Holland is over een periode van 200 jaar significant. De zoutbelasting neemt met name toe in de Haarlemmermeer polder en de polders ten westen van Gouda.

#### 6.3.5 *Chlorideconcentratie in dwarsprofielen*

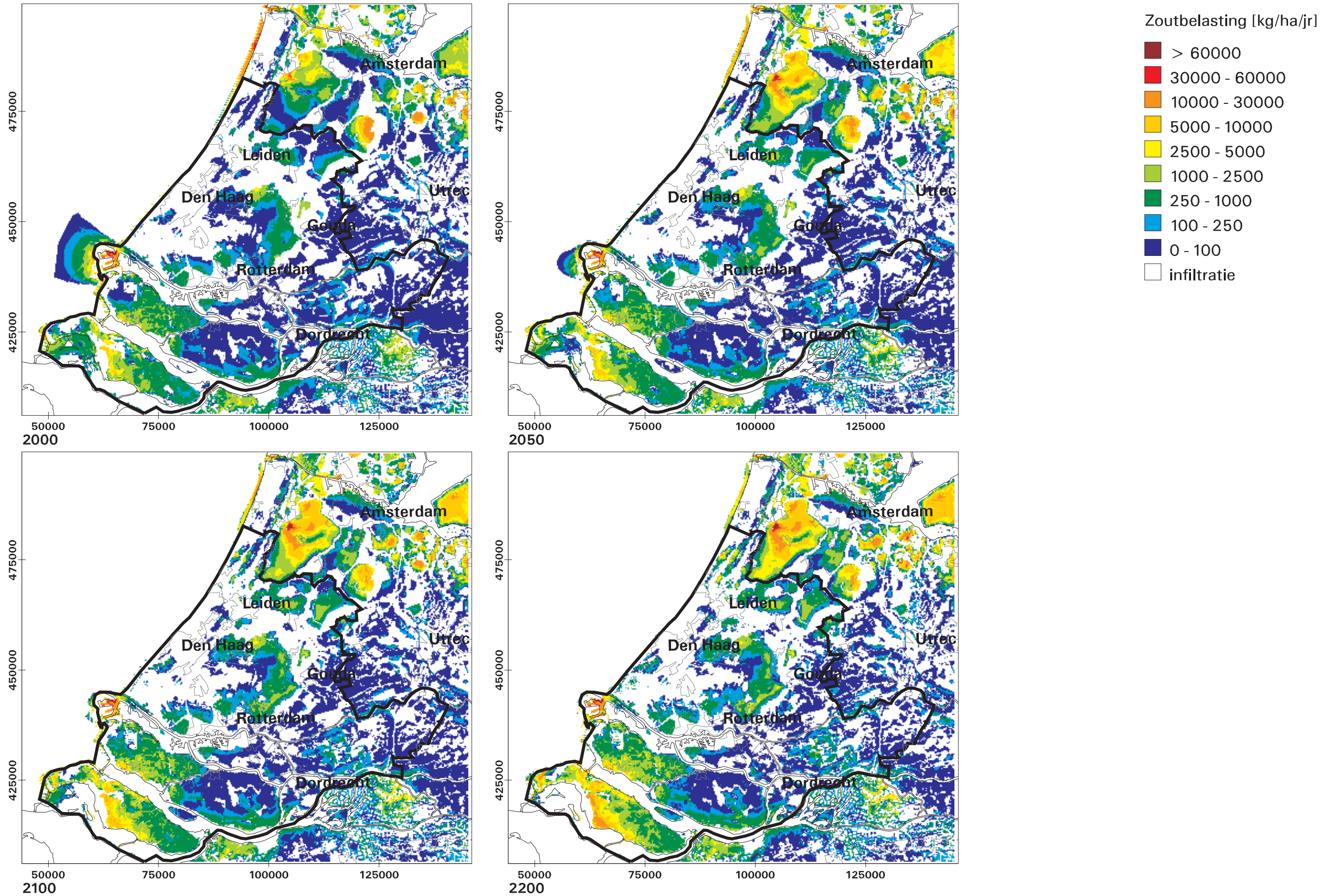
Figuur 25 toont de chlorideconcentratie in drie dwarsprofielen voor de jaren 2000, 2050, 2100, en 2200 bij de huidige onttrekkingssituatie (scenario I). Hierin is te zien dat verschillen in chlorideconcentratie vooral bovenin het systeem optreden. Profiel A loopt door de Haarlemmermeerpolder, net ten noorden van de provincie Zuid-Holland. Profiel A toont duidelijk het opwellen ('upconing') van brak en zout water ter plaatse van de Haarlemmermeerpolder. Ook de verzoeting onder het Naarderbos, door lokale infiltratie van zoet water is duidelijk zichtbaar. Profiel B en C liggen in de provincie Zuid-Holland. Beide profielen vertonen een patroon van verzilting in het bovenste watervoerend pakket, ter plaatse van de diepere polders. Meer naar de diepte nemen de chlorideconcentraties toe en reageert het systeem veel trager dan bovenin. Door de traagheid van het systeem en de relatief hoge chlorideconcentraties in de diepere pakketten, zijn over de periode van 200 jaar nauwelijks veranderingen te zien. Let wel, om het gehele spectrum van chlorideconcentraties te kunnen afbeelden, zijn de kleurintervallen in de legenda ruim opgezet. Hierdoor zijn niet alle subtiele overgangen te onderscheiden.



Figuur 22 - Chlorideconcentratie in onttrekkings situatie I en de verschillen na 200 jaar met de situatie zonder permanente zoetwateronttrekkingen (situatie II) en de situatie zonder brijnlozingen (situatie III). Blauw/groen = verzoeting, geel/oranje/rood = verzilting.

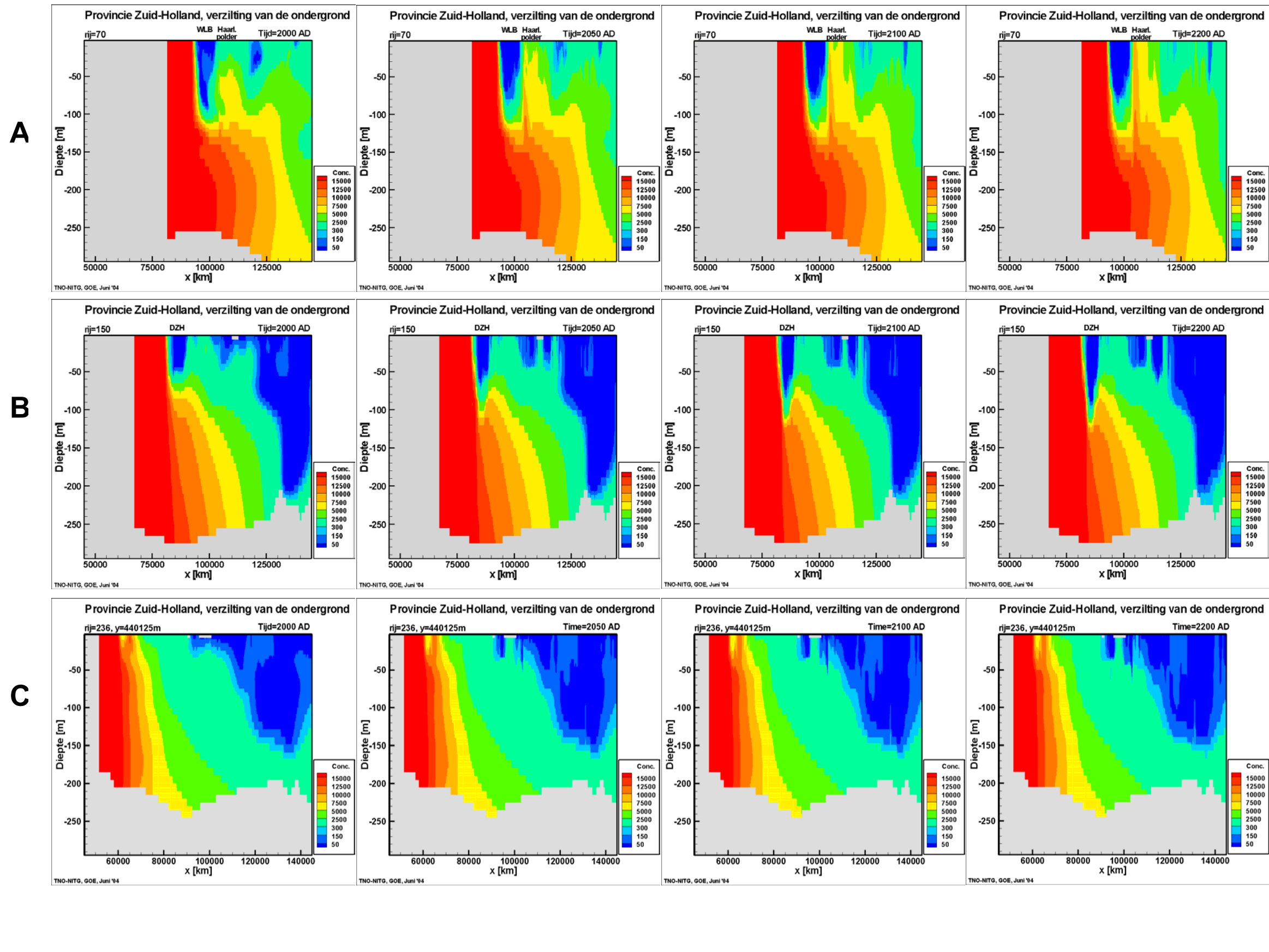


Figuur 23 - Kwelflux aan onderkant topsysteem voor 2000 bij onttrekkings situatie I en de verandering ten opzichte van 2000 voor de jaren 2050, 2100 en 2200 [mm/d]



Figuur 24 - Zoutbelasting op het topsysteem [kg/ha/jr] voor de jaren 2000, 2050, 2100 en 2200 voor de huidige onttrekkings situatie (onttrekkings situatie I).





Figuur 25 – Chlorideconcentratie [mg/l] in drie west-oost profielen voor de jaren 2000, 2050, 2100 en 2200, voor de huidige onttrekkings situatie (onttrekkingsituatie I). Posities van de profielen zijn aangegeven in de figuur rechtsonder.

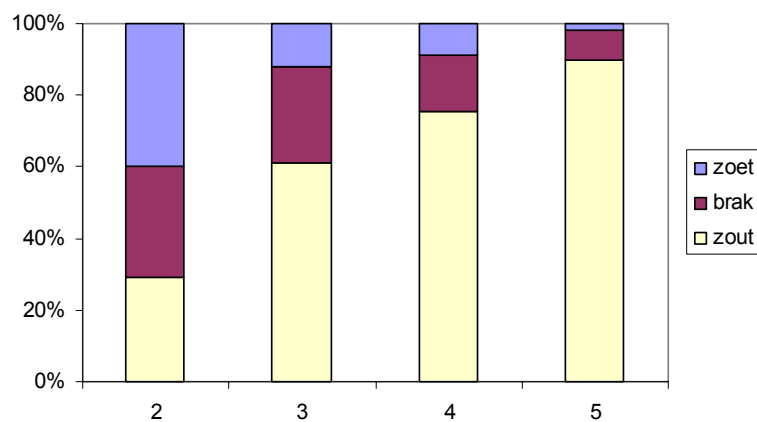
### 6.3.6 Samenstelling grondwater

Over de gehele diepte is de samenstelling van het grondwater in de provincie Zuid-Holland als volgt:

- Zoet water: 36%
- Brak water: 14%
- Zout water: 50%.

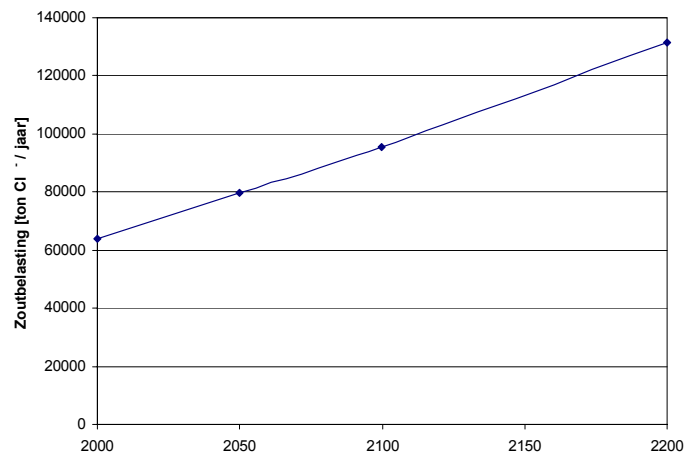
Over een periode van 200 jaar zijn de verschillen tussen de drie onttrekkings situaties (scenario's) klein; minder dan 1% verandering van de percentages zoet, brak en zout water.

De verhouding tussen de hoeveelheden zoet, brak en zout water verschilt per watervoerend pakket (figuur 26).



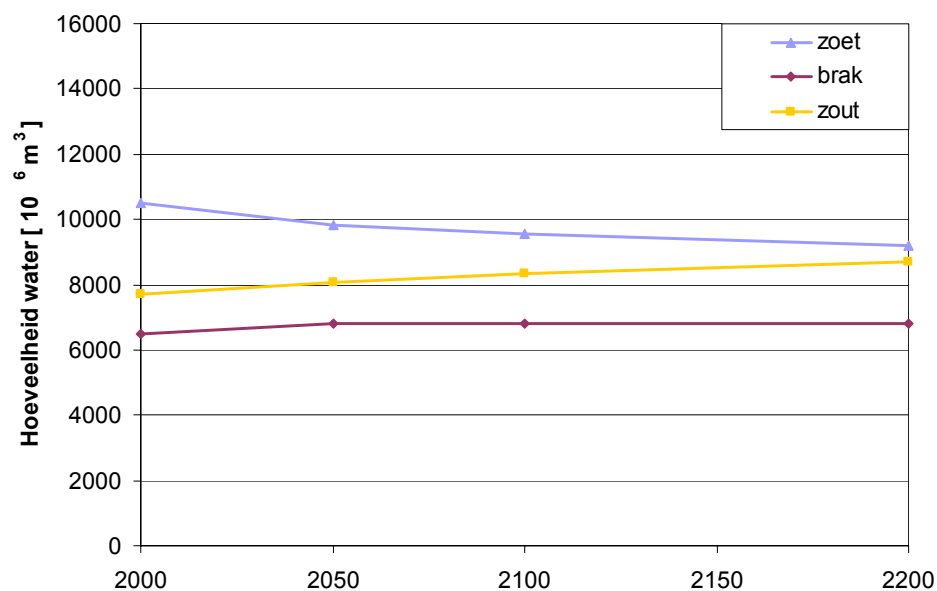
Figuur 26 – Percentage zoet, brak en zout grondwater per watervoerend pakket.

De totale hoeveelheid chloride (in ton per jaar), die bij onttrekkings situatie I door kwelstroming de provincie Zuid-Holland instroomt, is weergegeven in figuur 27. In totaal bevat het systeem een miljard ton chloride. Er bevindt zich dus momenteel al veel chloride in het systeem. Over een periode van 200 jaar is de relatieve verandering van de chloridebelasting op het totale systeem klein (< 1%), maar de absolute toename van de zoutbelasting op het topsysteem is groot, namelijk een verdubbeling van de chloridebelasting over 200 jaar. Figuur 27 toont de zoutbelasting in ton Cl<sup>-</sup>/ jaar op een diepte van -12.5 m N.A.P.



Figuur 27 – Zoutbelasting (in ton Cl<sup>-</sup>/jaar) op -12.5 m N.A.P. in de provincie Zuid-Holland voor de huidige onttrekkings situatie (onttrekkings situatie I).

In het bovenste deel van het grondwatersysteem, zien we lokaal duidelijke veranderingen. In figuur 28 is de bovenste 25 meter van het systeem weergegeven. De figuur toont de hoeveelheden zoet, zout en brak grondwater als functie van de tijd. De totale hoeveelheid zoet water neemt in de bovenste 25 meter af met maximaal 12 % (verschil 2200 en 2000).

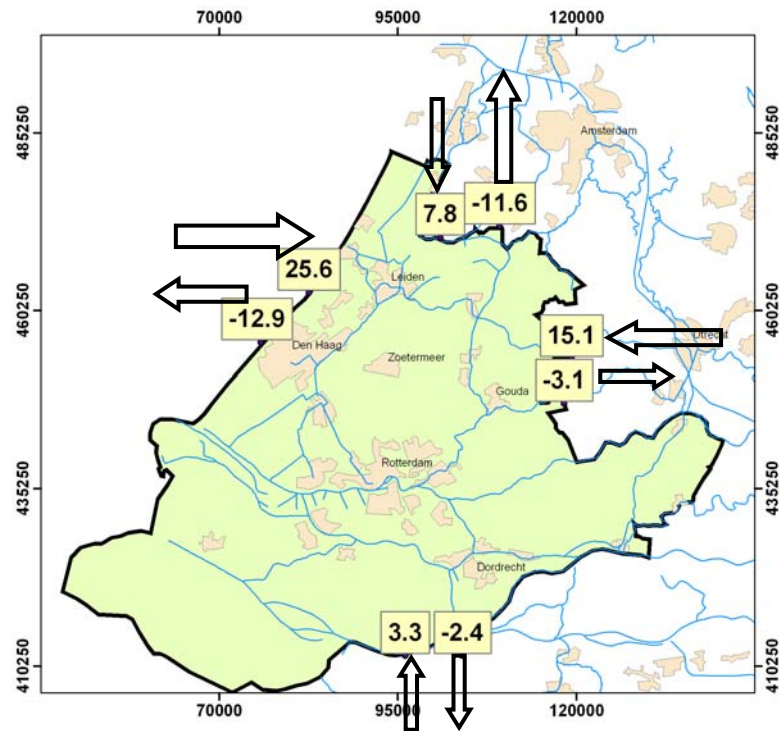


Figuur 28 – Verloop van de hoeveelheid zoet, brak en zout grondwater voor de huidige onttrekkings situatie over een periode van 200 jaar in de bovenste 25 meter.

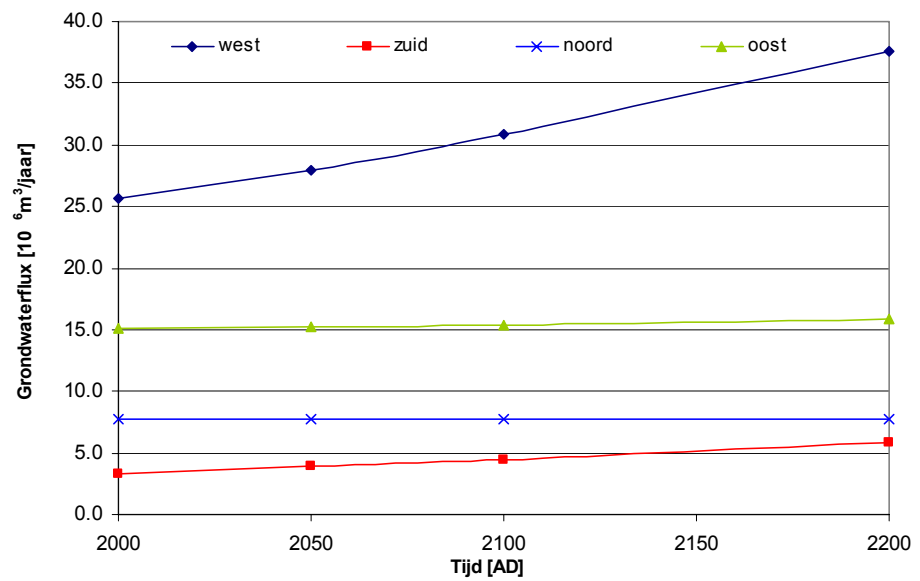
### 6.3.7 *Grondwaterflux over de randen van de provincie Zuid-Holland*

De horizontale grondwaterflux over de modelranden in 2000 is weergegeven in figuur 29. De pijlen geven de bruto-fluxen aan. De netto-flux over de rand bestaat uit de som van de twee bruto-fluxen. De bruto-flux over de westrand bedraagt dan bijvoorbeeld  $(25.6 + -12.9 =) 12.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{jaar}$ . Fluxen met een positieve waarde komen de provincie in, fluxen met een negatieve (-) waarde gaan over de rand de provincie uit.

De helft van de horizontale flux stroomt vanuit westelijke richting de provincie binnen. Daarnaast is een groot deel van het water afkomstig van de oostgrens van de provincie; de Utrechtse Heuvelrug. Het laaggelegen gebied ten noorden van de provincie, met de polders Schermer, Beemster, Wormer en Purmer trekt relatief veel water aan. Hierdoor stroomt bijna veertig procent van het water over de noordelijke grens naar de provincie Noord-Holland. Figuur 30 toont een toename van de hoeveelheid binnenstromend water over de westrand na van 200 jaar van bijna vijftig procent, deze toename wordt veroorzaakt door de stijging van de zeespiegel.



Figuur 29 – Horizontale grondwaterflux [ $10^6 \text{ m}^3 / \text{jaar}$ ] over de randen van de provincie Zuid-Holland in het jaar 2000.



Figuur 30 – Inkomende horizontale grondwaterflux over de grenzen van de provincie als functie van de tijd.

### 6.3.8 *Chlorideflux over de randen van de provincie Zuid-Holland*

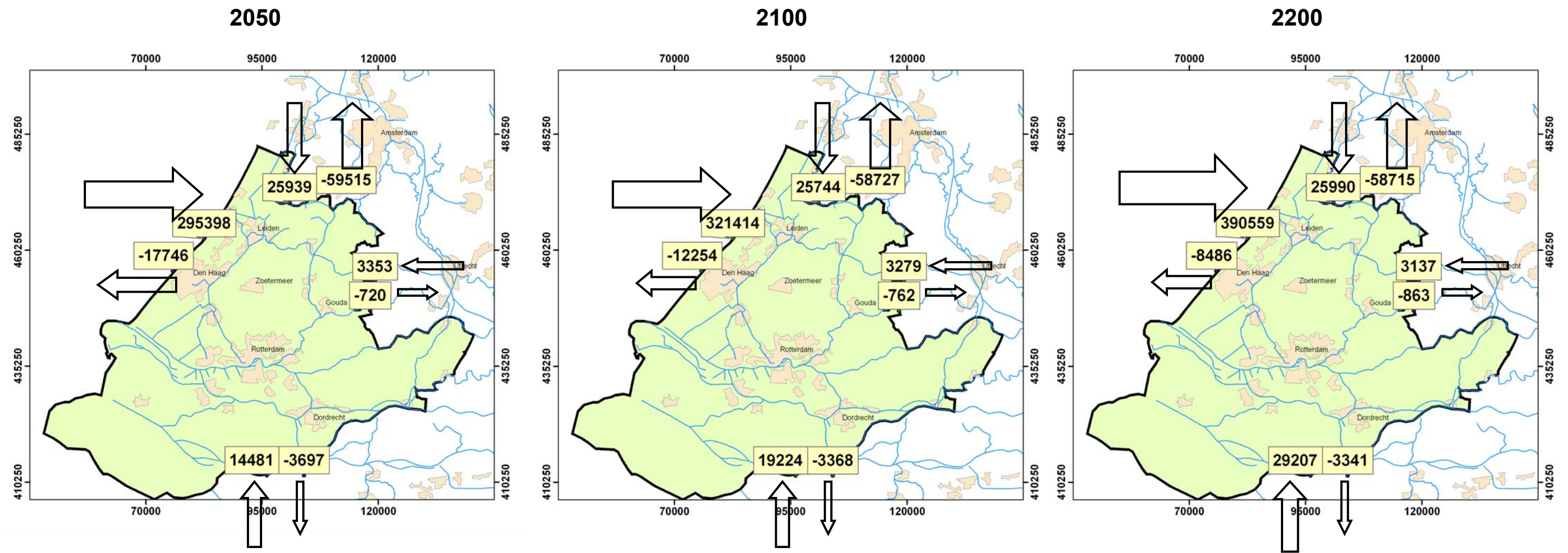
Ten slotte is op basis van stromingssnelheden op de modelranden de chlorideflux over de modelranden bepaald. De horizontale chlorideflux is afgebeeld per scenario voor de jaren 2050, 2100, en 2200 in figuur 31 tot en met figuur 33. Ook hier geldt dat bruto-fluxen zijn weergegeven. Positieve fluxen komen de provincie in, negatieve fluxen gaan de provincie uit.

Zoals verwacht aan de hand van voorafgaande conclusies zijn de verschillen in horizontale chlorideflux tussen de verschillende onttrekkingsituaties minimaal. De randen liggen verhoudingsgewijs ver weg van de desbetreffende ingrepen. De grootste bijdrage van de zoutflux komt vanuit de modelrand in het westen: de Noordzee rand (87% van alle inkomende flux). Hoewel over deze westrand ook brak en zout grondwater de zee instroomt, komt er netto toch zout grondwater de provincie binnen. Daarnaast stroomt er een behoorlijke hoeveelheid zout naar de Kop van Noord-Holland, doordat het laaggelegen gebied met de polders Schermer, Beemster, Wormer en Purmer relatief veel brak grondwater aantrekt. Verontrustend is de flinke toename van zouttoevoer vanuit de westrand over een periode van 200 jaar: een toename van ruim dertig procent.

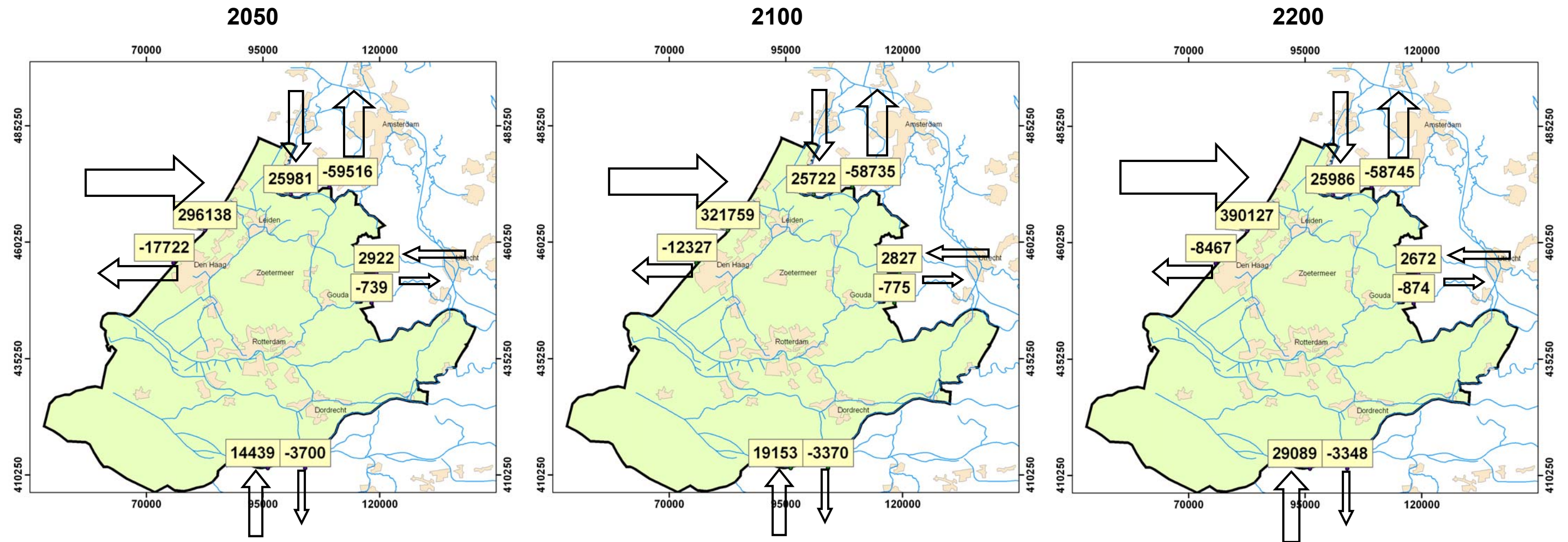
### 6.3.9 *Betrouwbaarheid resultaten*

De modelresultaten zijn verkregen op basis van modelleertechnieken die als ‘state of the art’ worden beschouwd. Bovendien zijn de toegepaste modelconcepten zodanig gekozen dat ze geschikt zijn voor berekening van effecten in de watervoerende pakketten. De combinatie van deze state of the art technieken en een optimaal gebruik van de beschikbare metingen hebben binnen het kader van dit project een maximaal haalbare nauwkeurigheid mogelijk gemaakt. Hierbij kan worden opgemerkt dat wanneer de in het uitgangsmodel aangebrachte verandering niet al te groot is, de nauwkeurigheid van effecten een orde van grootte (b.v. 10 maal) nauwkeuriger is dan de nauwkeurigheid van een berekende chlorideconcentratie zelf. Echter, een kwantificering van de nauwkeurigheid is binnen de gestelde kaders van deze studie niet mogelijk.

Uitgaande van het uitgangsmodel wordt bij de transportberekeningen de nauwkeurigheid van de berekende massabalans bepaald: in MOCDENS3D wordt deze berekend als het residu van alle inkomende, uitgaande en geborgen chloride, relatief ten opzichte van de initiële hoeveelheid chloride in het grondwatersysteem. De onnauwkeurigheid in deze massabalans van het stoftransportmodel is klein en bedraagt na een simulatieduur van 200 jaar slechts 0.26 procent.

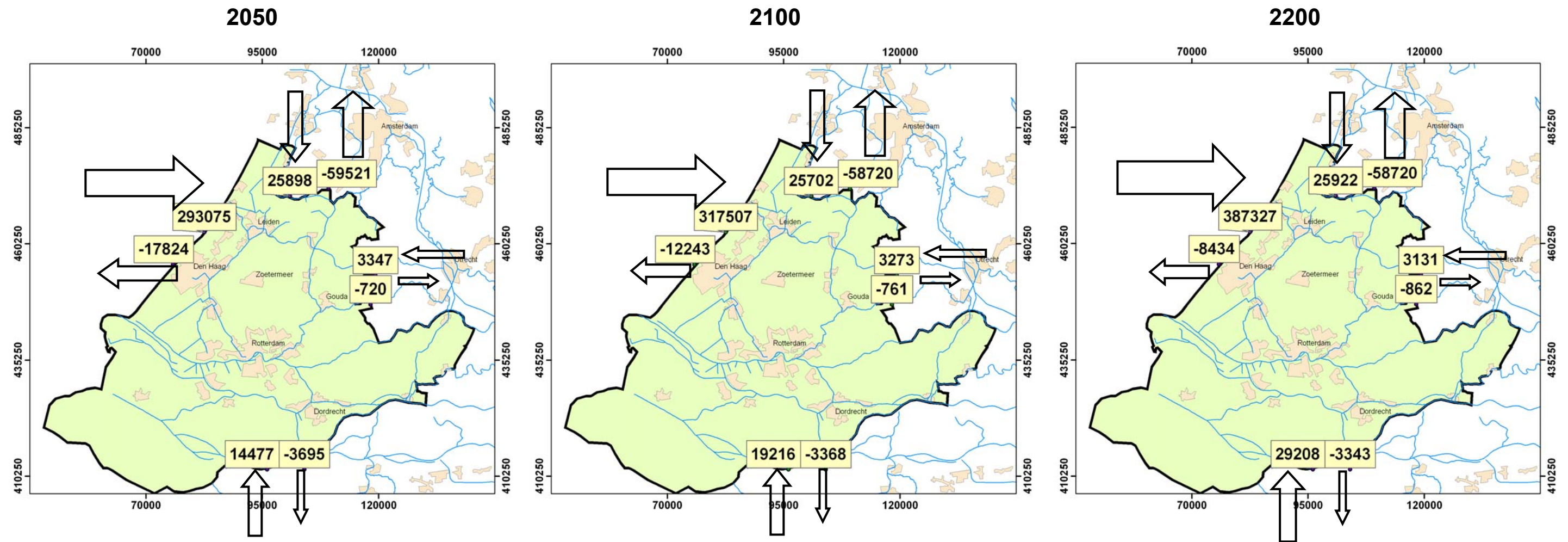


Figuur 31 – Totale chloridebalans over de modelranden [ ton cl /jaar] voor de huidige onttrekkingsituatie (onttrekkingsituatie I).



Figuur 32 - Totale chloridebalans over de modelranden [ ton cI /jaar] voor de situatie zonder permanente zoetwateronttrekkingen (onttrekkings situatie II).





Figuur 33 - Totale chloridebalans over de modelranden [ ton cI /jaar] voor de situatie zonder brijnlozingen (onttrekkingsituatie III).

## 7 Conclusies en aanbevelingen

*Met betrekking tot de toekomstige verzilting van de provincie Zuid-Holland kan het volgende worden geconcludeerd:*

De chloridegehalten zijn het hoogst in het westen van het gebied en nemen af richting het zuidoosten. Diepe polders vertonen een verhoogd chloridegehalte ten opzichte van hun omgeving. Chloridegehalten nemen meestal toe met de diepte en kunnen lokaal sterk variëren onder invloed van grote drinkwaterwinningen, zoals in het zuidoosten van het modelgebied het geval is. Vooral in diepe polders zoals de Haarlemmermeerpolder en de polders ten westen van Gouda is over de periode van 200 jaar duidelijk een trend van verzilting te zien.

### Huidige zoetwatervoorraad

De totale zoetwatervoorraad<sup>4</sup> binnen de grenzen van de provincie Zuid-Holland bedraagt bijna 27 miljard kubieke meter zoet water (tabel 6). Het gaat hierbij om de totale hoeveelheid zoetwater in alle, in de ondergrond aanwezige, watervoerende pakketten en scheidende lagen. Hierbij is de indeling in watervoerende pakketten gehanteerd, zoals geschematiseerd door de provincie Zuid-Holland. Berekeningen zijn gebaseerd op een porositeit van 30%. De zoetwatervoorraad bevindt zich vooral in het oosten van de provincie.

Tabel 6 De zoetwatervoorraad in de provincie Zuid-Holland verdeeld over de verschillende watervoerende pakketten.

Watervoerend pakket	Zoetwatervoorraad (m <sup>3</sup> )
2	8090 · 10 <sup>6</sup>
3	1769 · 10 <sup>6</sup>
4	1854 · 10 <sup>6</sup>
5	1442 · 10 <sup>6</sup>
Deklaag en overige scheidende lagen	13822 · 10 <sup>6</sup>
<b>Totaal</b>	<b>26980 · 10<sup>6</sup></b>

Over de gehele diepte is de samenstelling van het grondwater in de provincie Zuid-Holland als volgt:

- Zoet water: 36%
- Brak water: 14%
- Zout water: 50%.

De verhouding zoet, brak en zout grondwater verschilt per watervoerend pakket:

- Watervoerend pakket 2: zoet, brak, zout water: 40, 31 en 29%;
- Watervoerend pakket 3: zoet, brak, zout water: 12, 27 en 61%;
- Watervoerend pakket 4: zoet, brak, zout water: 9, 16 en 75%;
- Watervoerend pakket 5: zoet, brak, zout water: 2, 8 en 90%.

<sup>4</sup> Voor zoet, brak en zout grondwater zijn de volgende chloridegehalten gehanteerd: **zoet**: chloridegehalte grondwater < 150 mg/l, **brak**: chloridegehalte tussen 150 mg/l en 1000 mg/l; **zout**: chloridegehalte > 1000 mg/l.

### **Snelheid van verzilting en verandering van de zoetwatervoorraad**

Om de snelheid van verzilting en verandering van de zoetwatervoorraad te bepalen, zijn drie verschillende toekomst scenario's doorgerekend:

- I. huidige onttrekkings situatie;
- II. situatie zonder permanente zoetwateronttrekkingen (dit zijn de onttrekkingen van drinkwatermaatschappij Hydron en van Waterbedrijf Europoort);
- III. situatie zonder brijnlozingen (en bijbehorende onttrekkingen).

In alle scenario's is rekening gehouden met bodemdaling en zeespiegelstijging (absolute zeespiegelstijging op de Noordzee van 0.5 cm per jaar).

In de eerste kilometers vanaf de kustlijn, in het duingebied, is de invloed van de zeespiegelstijging merkbaar; hierdoor neemt de infiltratie af. De invloed van de zeespiegelstijging dempt snel uit en is op 10 km vanaf de kust nog nauwelijks merkbaar. In het oosten van het gebied, waar de bodemdaling het sterkst is, neemt de kwelflux het meest toe (maximale toename 1.8 mm/d na 200 jaar). Over 200 jaar neemt de kwelflux in de gehele provincie Zuid-Holland gemiddeld met 22% toe. Daarnaast stijgt infiltratie naar het grondwatersysteem vanuit de boezemwaterlopen en vanuit de hoog gelegen veenweidegebieden. Hierdoor treedt enerzijds verzilting op van de diepe polders en anderzijds verzoeting van de infiltratiegebieden.

In totaal bevat het systeem een miljard ton chloride. Er bevindt zich dus momenteel al veel chloride in het systeem. Stoftransport is een traag proces. Effecten van ingrepen in het watersysteem zijn daarom niet snel zichtbaar. Op het *totale systeem* zien we daarom over een periode van 200 jaar een kleine verandering van de totale chloridebelasting (minder dan 1% verandering ten opzicht van het jaar 2000). Dit geldt eveneens voor de effecten op de totale zoetwatervoorraad.

Lokaal in het *bovenste deel* van het grondwatersysteem, daarentegen, treden wel aantoonbare veranderingen op. De toename van de zoutbelasting op het topsysteem is over een periode van 200 jaar significant. Met name de overgangen van diepe polders naar het hoger gelegen veenweidegebied of naar aangrenzende hoger gelegen boezems zijn zichtbaar.

Wanneer we kijken naar de *fluxen over de randen* van de provincie, zien we over een periode van 200 jaar een toename van de zouttoevoer over de westrand van de provincie met ruim dertig procent.

Vanwege de initieel hoge chlorideconcentraties in het systeem, is het effect van brijnlozingen en van het stopzetten van de zoetwateronttrekkingen op de chloridegehalten in het totale systeem klein (minder dan 1% verandering op de totale water- en stofbalans). Locale veranderingen ten gevolge van het stopzetten van brijnlozingen zijn klein ten opzichte van de chloridegehalten in de omgeving. Op de locatie van de brijnlozingen treedt verzoeting op in het eerste watervoerende pakket en een lichte verzilting in het tweede watervoerend pakket. Door het stopzetten van zoetwateronttrekkingen treedt ter plaatse van de grote onttrekkingen een verzoeting op.

### **Balans**

Het grondwatersysteem is nog niet in een evenwichtssituatie beland. Ook over 200 jaar heeft het grondwatersysteem nog geen dynamische evenwichtssituatie bereikt. Dit is enerzijds te zien aan de toenemende verzilting van de diepe polders en anderzijds aan verzoeting van de aangrenzende hoger gelegen gebieden.

Er zijn chloridebalansen opgesteld voor de drie onttrekkingsituaties op basis van fluxen over de modelranden.

*Op basis van de hierboven beschreven resultaten kunnen de volgende aanbevelingen voor een eventuele toekomstige uitbreiding van het model worden gedaan:*

De betrouwbaarheid van de initiële dichtheidsverdeling is sterk afhankelijk van het aantal en de ruimtelijke verdeling van chloridemetingen. Onderin het grondwatersysteem zijn relatief weinig bruikbare metingen aanwezig, terwijl juist hier vaak brak en zout grondwater voorkomt. Het verdient aanbeveling het aantal chloridemetingen op grotere diepten te vergroten. Er kan dan een nauwkeurigere dichtheidsverdeling worden verkregen, op basis waarvan het stoftransportmodel kan worden verbeterd.

Omdat het zoutgehalte van sloten en plassen in belangrijke mate bepalend is voor de functies die aan deze wateren toegekend kunnen worden, is het noodzakelijk om in een eventueel vervolgonderzoek op een kleinere tijdschaal te modelleren. Om maatregelen te kunnen formuleren om de verzilting te beheersen, is het van belang om het proces, dat voor deze snelle dynamiek verantwoordelijk is, mee te nemen. In dat geval is het daarom aan te bevelen de vaste bovenrandvoorwaarde uit het huidige model te vervangen door een gedetailleerde topsysteemschematisatie.

Hoewel de verzilting en eventueel de verzoeting van het diepere grondwater traag verlopen, blijkt de uitstroming van zout naar het oppervlakkige waterhuishoudkundige systeem een uiterst dynamisch proces te zijn. Om aan te kunnen geven in hoeverre ongewenste verziltingseffecten verminderd of vermeden kunnen worden wordt daarom aanbevolen de gevolgen van verzilting op maaiveldniveau in beeld te brengen. Daartoe dient het topsysteem gekoppeld te worden aan een oppervlaktewatermodel. Op deze wijze kunnen zoutfluxen van en naar waterlopen op gedetailleerde manier worden geanalyseerd.

## 8 Referenties

Bardoel, T., P.G.M. de Louw, G. van den Eertwegh e.a. (2003) Het effect van waterbeheer op de chloride- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas. Datarapport: uitwerking van verzamelde gegevens en eerste water- en stoffenbalans. TNO-rapport NITG 03-098-B.

Grontmij Noord-Holland (2001) Geohydrologisch Onderzoek Wieringerrandmeer, in opdracht van Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen namens de stuurgroep 'Water Bindt'.

Harbaugh, A.W. en M.G. McDonald (1988) A modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Book 6. Chapter A1. Techniques of Waterresources Investigations of the United States Geological Survey.

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

KIWA Water Research 2002 (concept) Het zout der aarde, in opdracht van Het Hoogheemraadschap van Rijnland.

Konikow, L.F., D.J. Goode and G.Z. Hornberger (1996) A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D), U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 pp.

Linden, W. van der; A.H.M. Kremers en H.J.T. Weerts (2002) Landsdekkende karakterisatie topsyteem, TNO-rapport NITG 02-112-B, Delft.

Oude Essink, G.H.P. (1998) Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D, Stromingen, 4 (1), 5-23.

Oude Essink, G.H.P. (2001) Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in The Netherlands: A Numerical Study, Transport in Porous Media, 43 (1): 137-158.

Post, V.E.A. 2004. De oorsprong van het brakke en zoute grondwater in het Nederlandse kustgebied. Stromingen, 10, 51-61.

Provincie Zuid-Holland (1998). Bruisend Water, 'Perspectieven voor het waterbeheer', Provincie Zuid-Holland en de Zuidhollandse Waterschapsbond.

TNO-NITG (1998) REGIS, Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem, database TNO-NITG, Delft.

TNO-NITG (1999) DINO, Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond, database TNO-NITG, Utrecht.

TNO-NITG (2001) CUS, Construction Underground Scemes, versie 1.02, TNO-NITG, Delft.

Valstar, J., 2001. Inverse modeling of groundwater flow and transport. Proefschrift Technische Universiteit Delft. ISBN 9064640629.

Witteveen & Bos (2000) Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel, in opdracht van Provincie Noord-Holland, Waterschap Hollands Kroon, Gemeente Texel en Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen.

## A Invulling polderpeilen

Om de bovenrandvoorwaarde voor het model vast te leggen is een kaart nodig met de freatische grondwaterstanden die afgeleid worden van waterpeilen in boezems, plassen, rivieren en kanalen en polders. De door provincie Zuid-Holland geleverde peilenkaart (figuur A1) beslaat niet het gehele modelgebied. Om deze reden is een aantal verschillende bronnen stapsgewijs gecombineerd tot een gebiedsdekkende peilenkaart. De verschillende stappen en de gebruikte bronnen zullen hieronder worden behandeld, waarbij de bronnen steeds **vet** gedrukt zijn.

### 1. Peilenbestand TNO-NITG (**nedwalo**) + omtrekken waterlopen (**biza\_water**)

Het **nedwalo bestand van TNO-NITG** bestaat uit lijnsegmenten waaraan een zomer- en winterpeil is gekoppeld. Ook is per lijnsegment de natte omtrek bekend maar vooral bij brede waterlopen geeft deze slechts een benadering van de werkelijke omtrek van een waterloop. Daarom is het **nedwalo bestand** gecombineerd met het **biza\_water bestand** waarin de omtrek van de waterlopen wel nauwkeurig is vastgelegd. Zodoende zijn voor de belangrijkste oppervlaktewateren (de grote rivieren, Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal + IJ) de peilen vastgelegd.

Kleinere waterlopen (bijv. Ringvaart Haarlemmermeer) zijn niet opgenomen in het **biza\_water bestand**. Om deze in het model op te nemen is het **nedwalo bestand** over het modelgrid heen gelegd en is aan alle cellen waarin een dergelijke waterloop voorkomt het bijbehorende peil aan de modelcel toegekend. Op die manier wordt verzekerd dat alle waterlopen worden meegenomen in het model (figuur A2).

### 2. Polderpeilenbestand TNO-NITG

TNO-NITG beschikt over een **polderpeilenbestand** van het grootste gedeelte van West-Nederland dat vervaardigd is in het kader van het onderzoek 'De achtergrondbelasting van het oppervlaktewatersysteem met N, P en Cl en enkele ecohydrologische parameters in West-Nederland'. Dit bestand beslaat een groter deel van het modelgebied dan het door de provincie aangeleverde peilenbestand. Om deze reden is ervoor gekozen om gebruik te maken van het bestand van TNO-NITG. Voor een aantal plassen en meren (Vuntus, Kortenhoefse plassen, Westeinderplassen, Braassemermeer, Kagerplassen, Vlietlanden, Zegerplas) waren geen gegevens beschikbaar en deze zijn met behulp van de **topografische atlas van Nederland 1:50.000** bepaald. De resulterende peilenkaart is dekkend voor een groot gedeelte van het modelgebied (figuur A3).

### 3. Primaire waterlopen uit grondwatermodel Brabant TNO-NITG

In de provincie Brabant zijn de peilen overgenomen die door TNO-NITG zijn gebruikt in het **grondwatermodel** van deze provincie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen primaire waterlopen en secundaire waterlopen. In de eerste plaats worden de primaire waterlopen gebruikt (figuur A4).

### 4. Secundaire waterlopen uit grondwatermodel Brabant TNO-NITG

Indien zich in de provincie geen primaire waterloop in een modelcel bevindt wordt, indien aanwezig, het peil van de secundaire waterlopen uit het **grondwatermodel van Brabant** toegekend (figuur A5).

### 5. Noordzee

Met behulp van het **biza\_water bestand** is de ligging van de Noordzee bepaald. Aan modelcellen die hiertoe behoren is een peil van  $-0.094$  m NAP toegekend (figuur A6).

### 6. IJsselmeer

Net als voor de Noordzee is voor het IJsselmeer de omtrek m.b.v. het **biza\_water bestand** bepaald en aan de corresponderende modelcellen is een peil van  $-0.2$  m NAP toegekend (figuur A7).

### 7. Maaiveldhoogtebestand REGIS

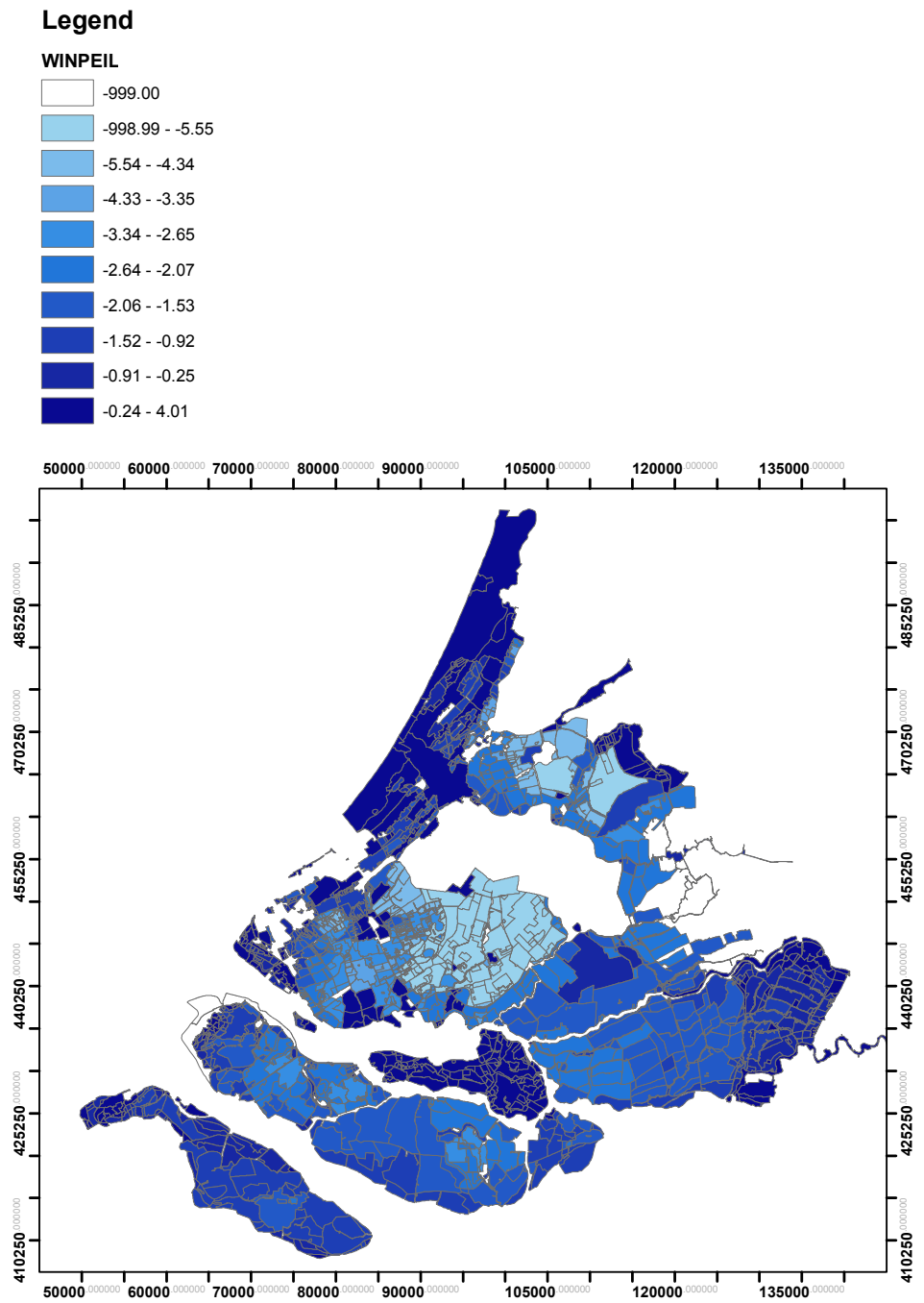
Op plaatsen waar nog steeds gegevens ontbreken en die boven 0 m NAP liggen wordt verondersteld dat de grondwaterstand 0.5 m beneden maaiveld ligt (figuur A8). De maaiveldhoogten zijn afkomstig uit **REGIS**. Dit levert een overschatting op in de duingebieden en de Utrechtse heuvelrug maar is wel een goede benadering voor het rivierengebied.

### 8. Maaiveldhoogtebestand REGIS provincie Flevoland

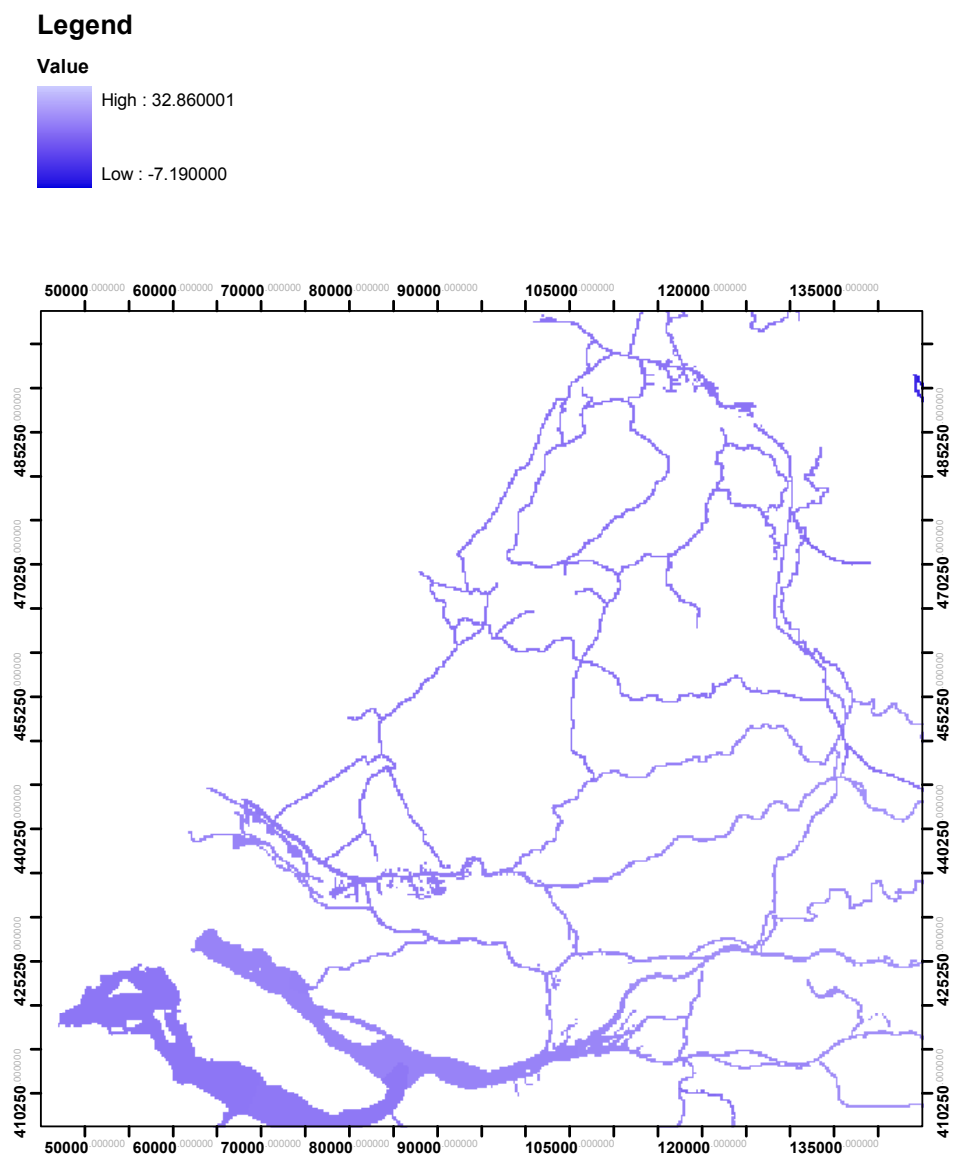
Voor de provincie Flevoland wordt er ook vanuit gegaan dat de grondwaterstand 0.5 meter beneden maaiveld ligt (figuur A9).

9. **Indien er na de voorafgaande stappen nog steeds cellen zijn waarvan geen gegevens van bekend zijn dan wordt in die cel *de waarde van de dichtstbijzijnde buurcel* aangenomen (figuur A10).**



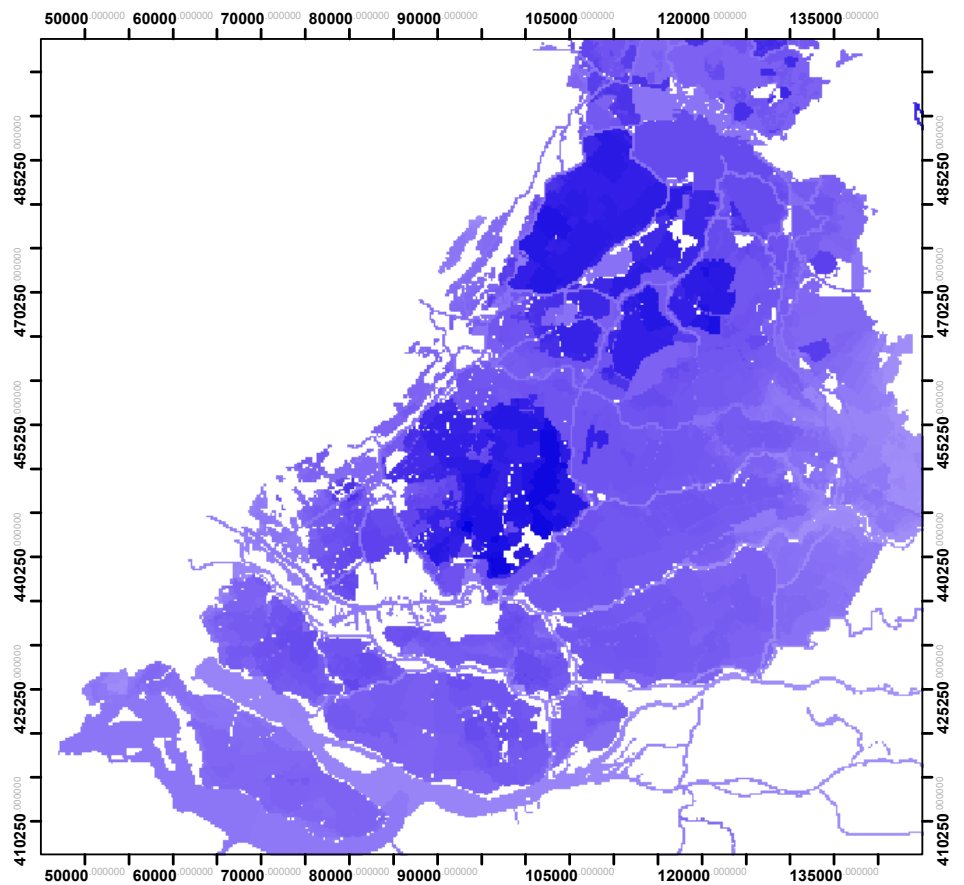
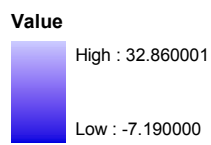


Figuur A1 - Peilkaart aangeleverd door provincie Zuid-Holland.



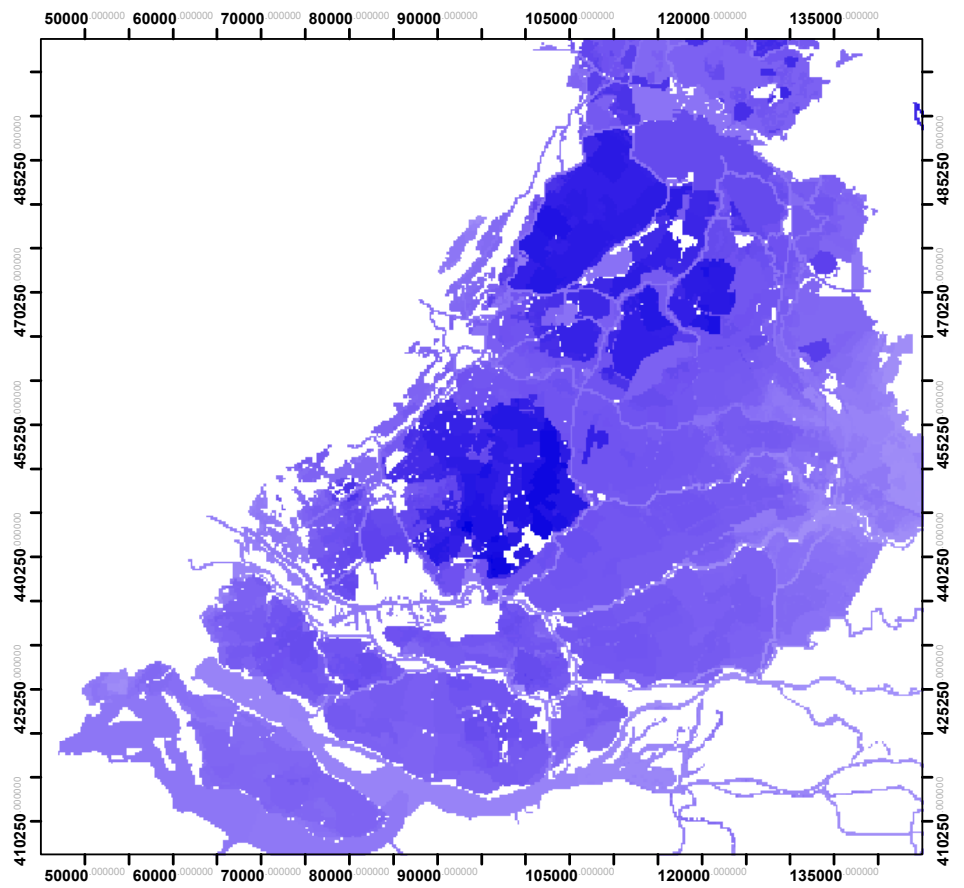
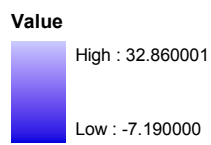
*Figuur A2 - Peilen in de belangrijke (grote) waterlopen.*

### Legend

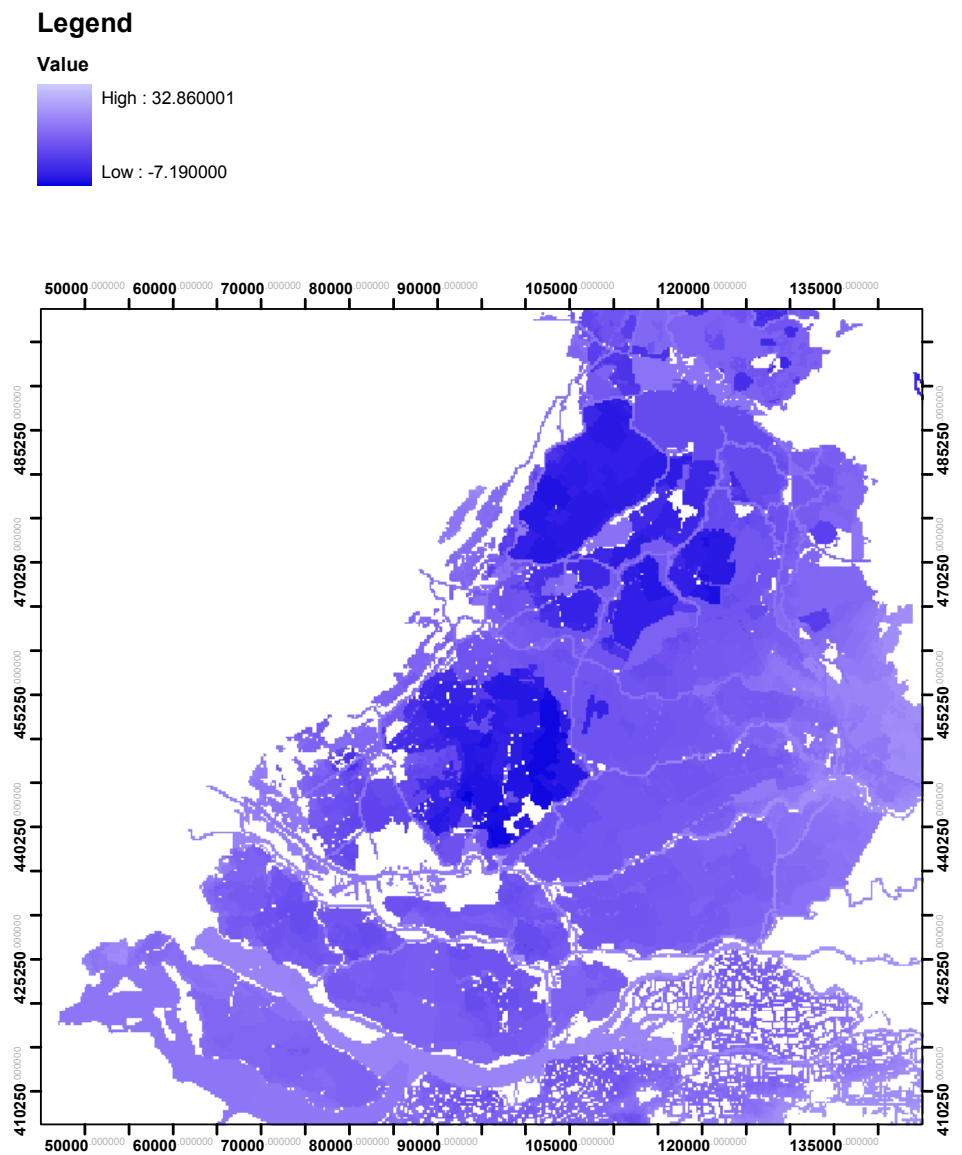


*Figuur A3 - Peilenkaart na toevoeging polderpeilen West-Nederland*

### Legend

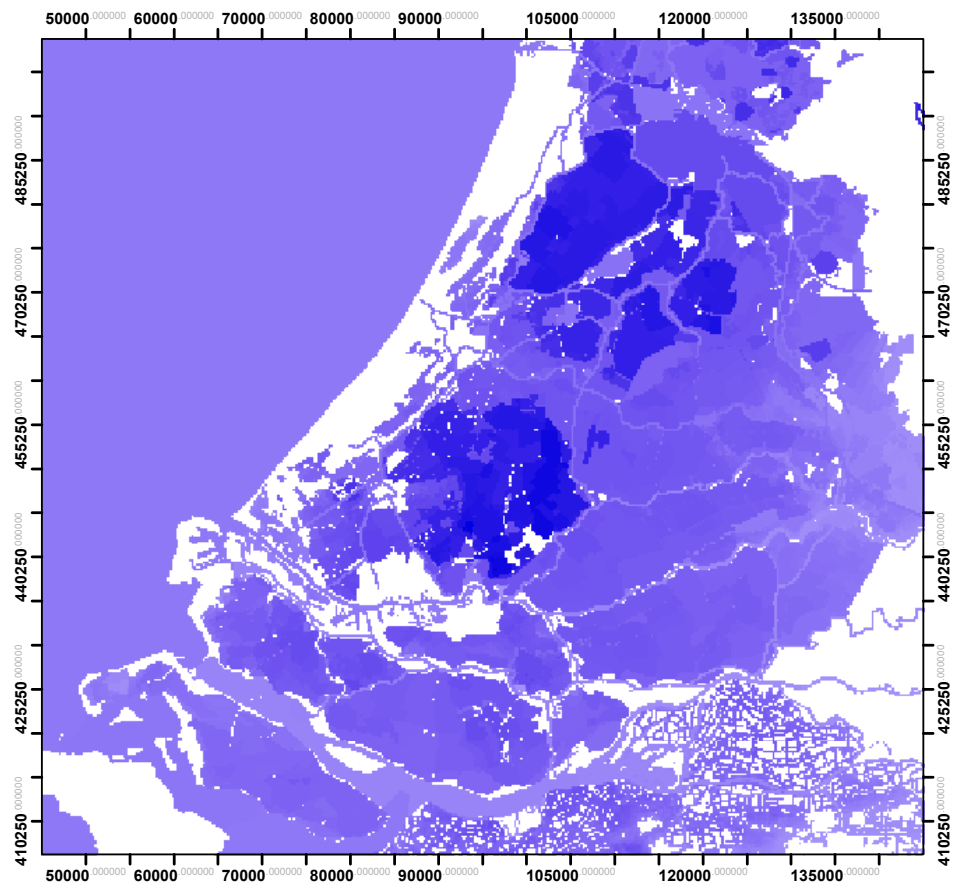
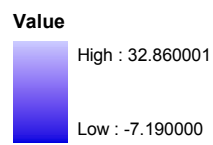


*Figuur A4 - Peilenkaart na toevoeging primaire waterlopen provincie Noord-Brabant.*



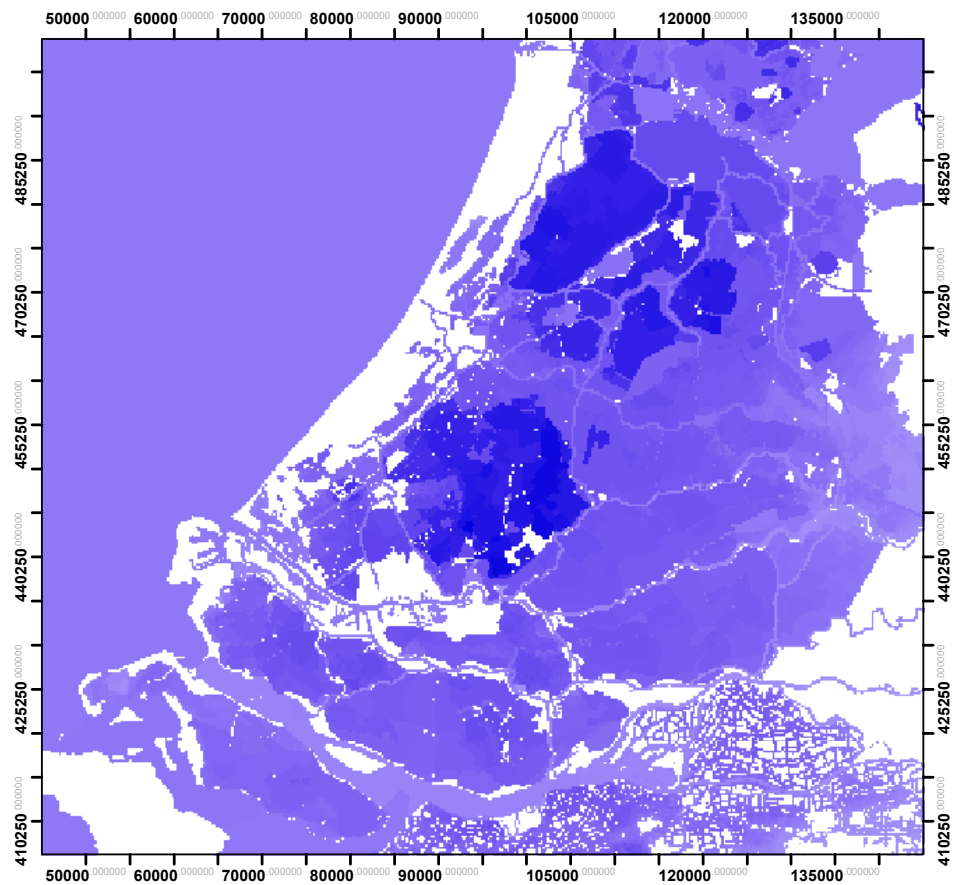
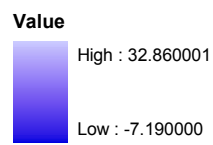
*Figuur A5 - Peilenkaart na toevoeging secundaire waterlopen provincie Noord-Brabant.*

### Legend



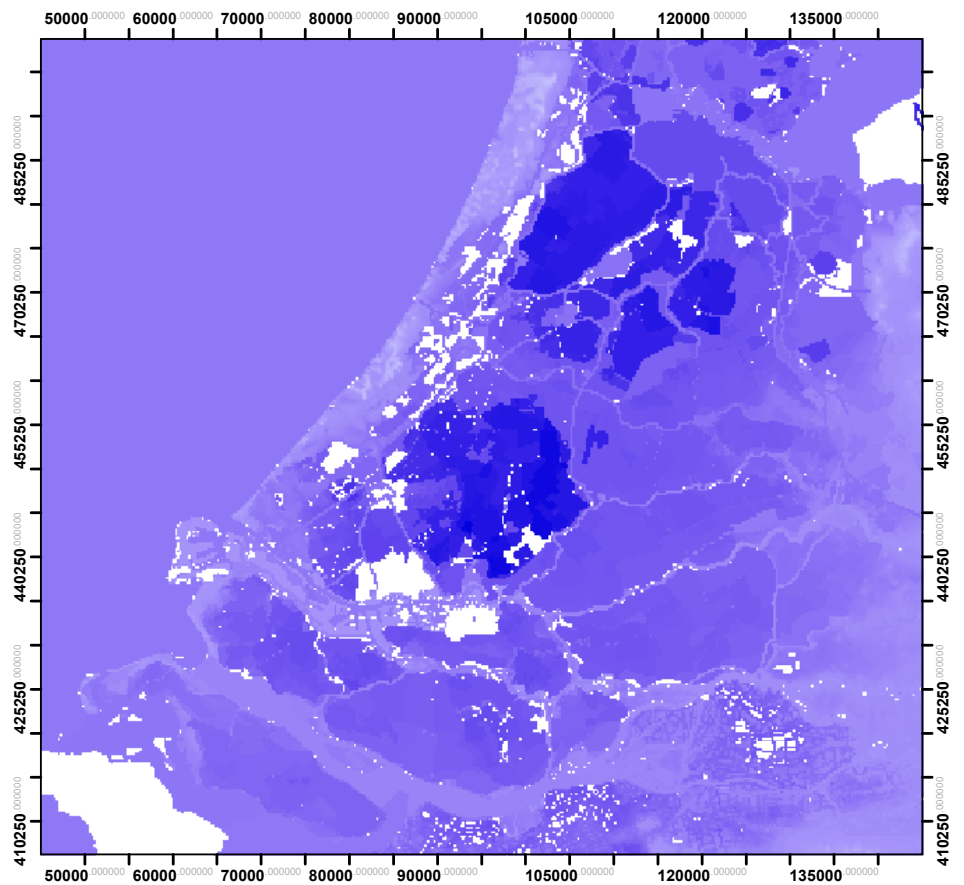
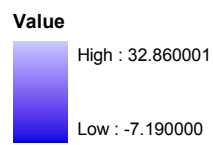
*Figuur A6 - Peilenkaart na toevoeging peil Noordzee.*

### Legend



*Figuur A7 - Peilenkaart na toevoeging peil IJsselmeer.*

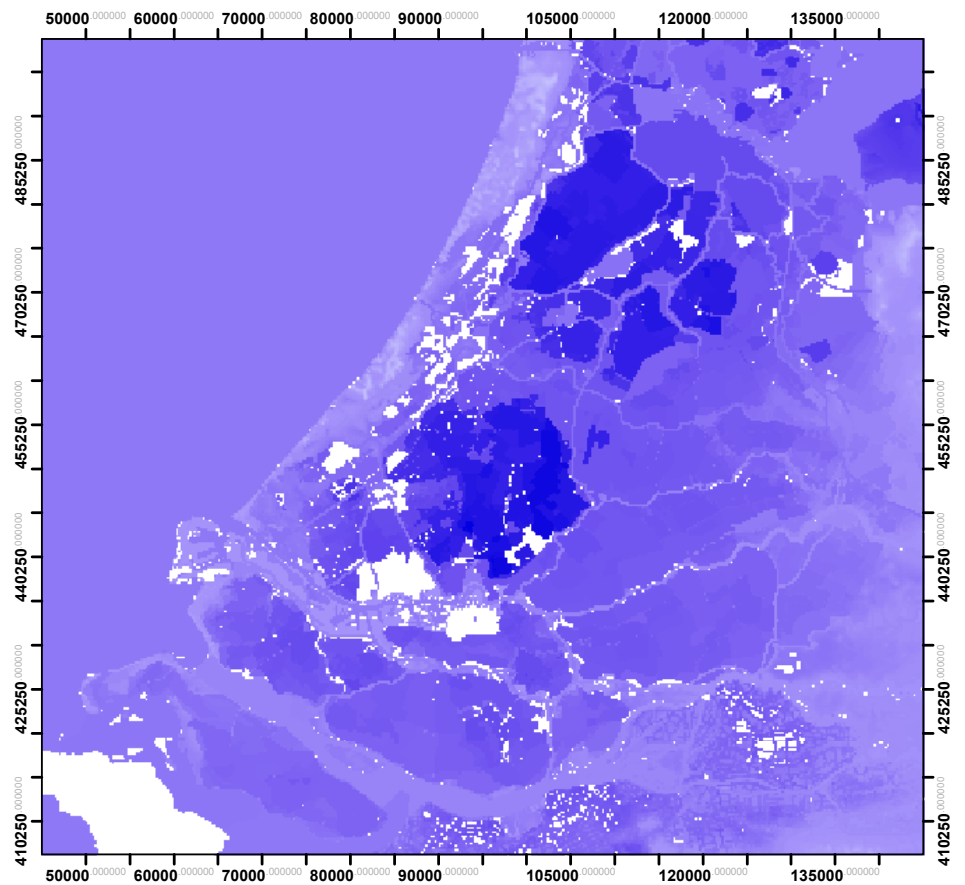
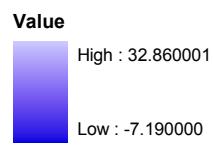
### Legend



*Figuur A8 - Peilenkaart na toevoeging maaiveld-0.5 meter uit REGIS.*

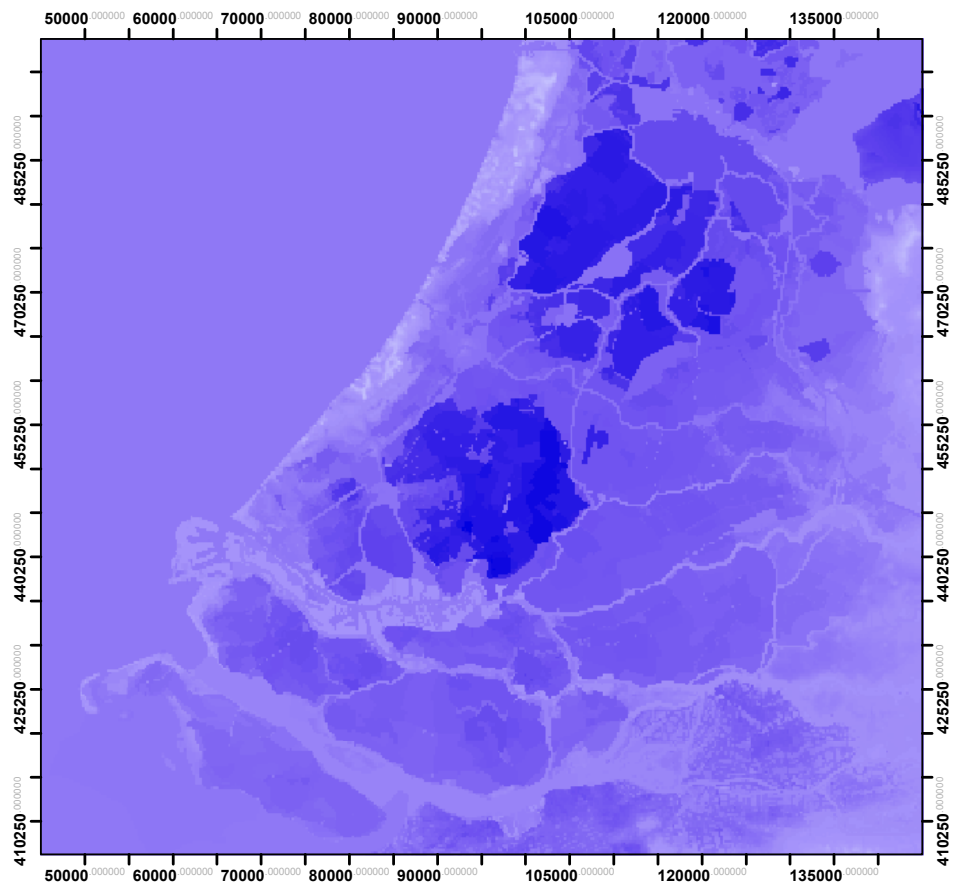


### Legend



*Figuur A9 - Peilenkaart na toevoeging peilen provincie Flevoland.*

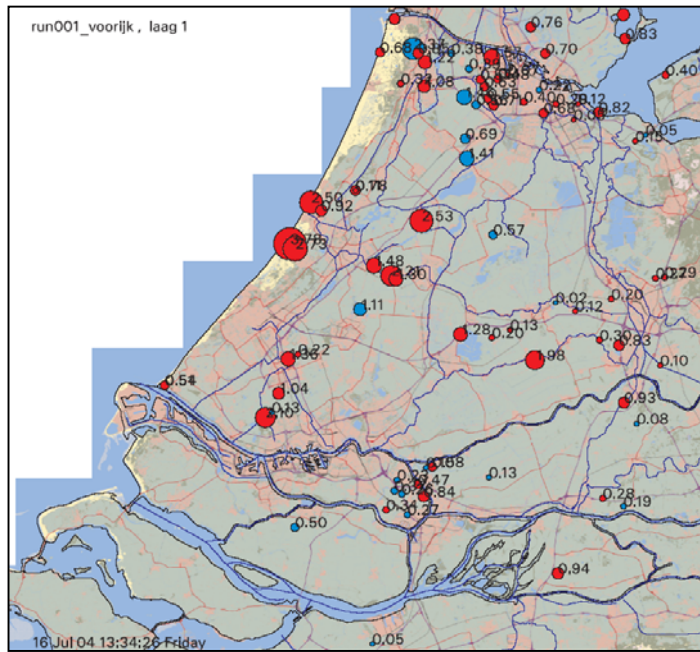
### Legend



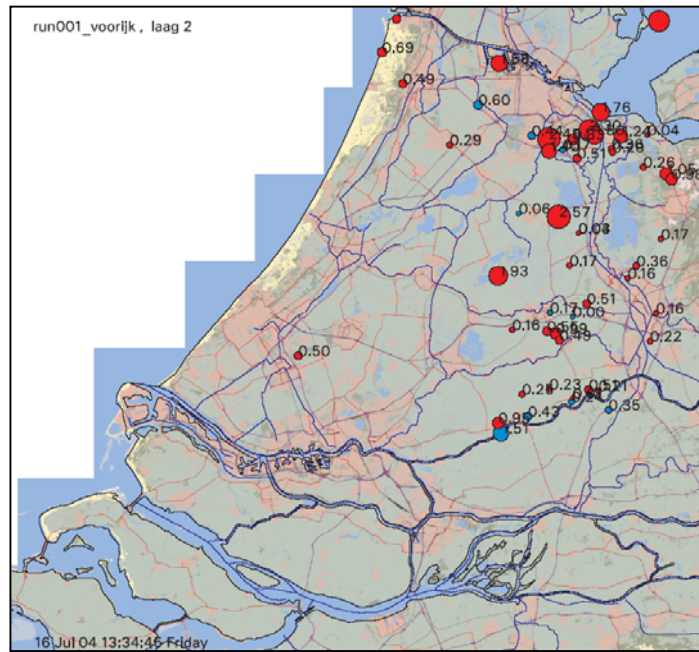
*Figuur A10 - Ontbrekende gegevens: waarde dichtstbijzijnde buurcel.*

## **B Residuen stromingsmodel**

### B.1 Vóór parameter optimalisatie



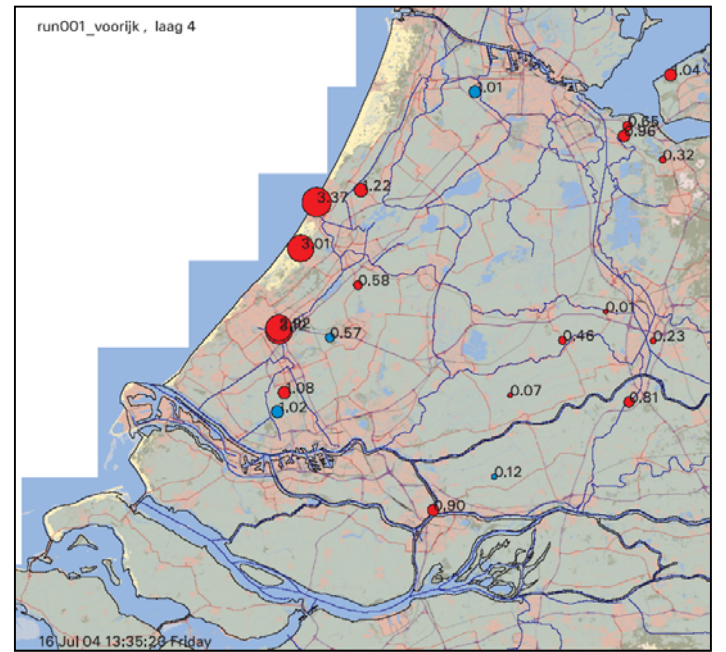
Residuen modellaag 2



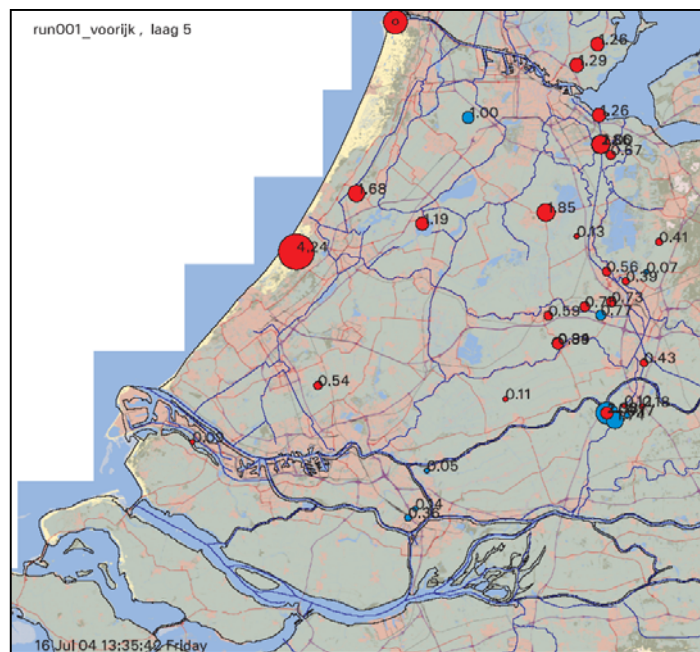
Residuen modellaag 3



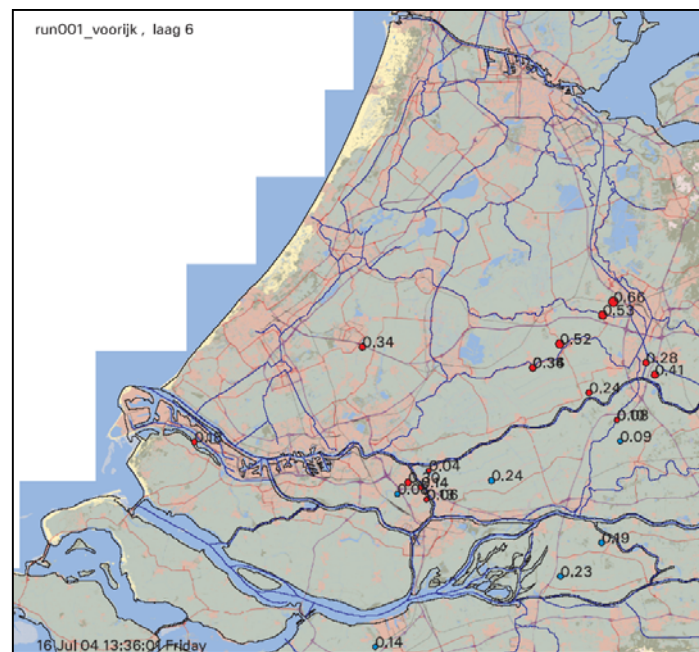
Residuen modellaag 4



Residuen modellaag 5



Residuen modellaag 6



Residuen modellaag 7



Residuen modellaag 8

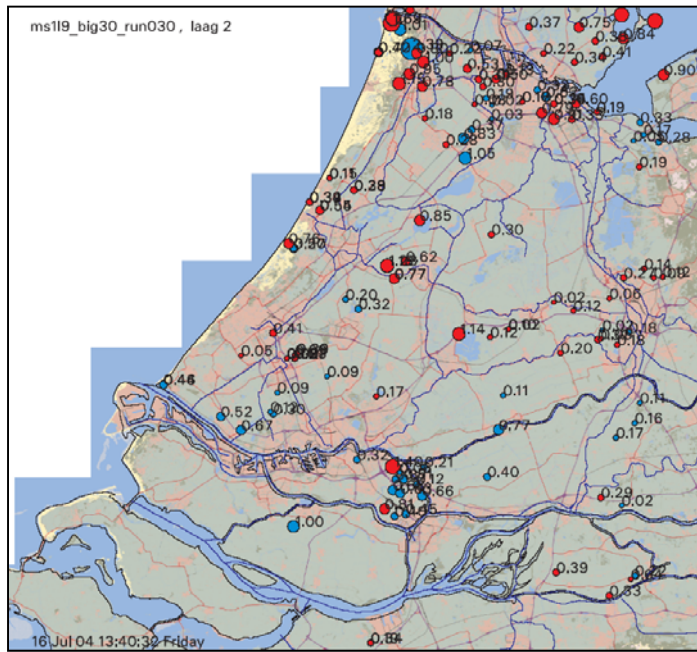


Residuen modellaag 9

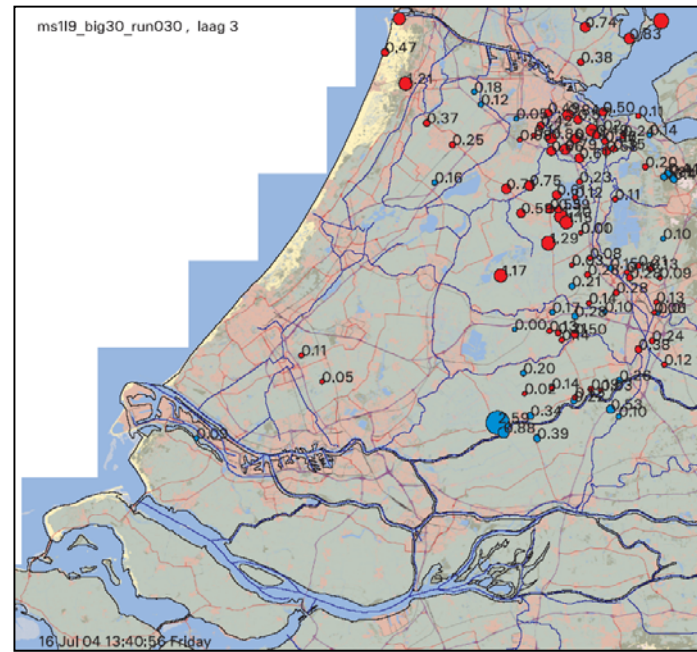
- berekend groter dan gemeten
- berekend kleiner dan gemeten

Figuur B1 - Residuen (berekende zoetwaterstijghoogte – gemeten zoetwaterstijghoogte) vóór parameteroptimalisatie [m].

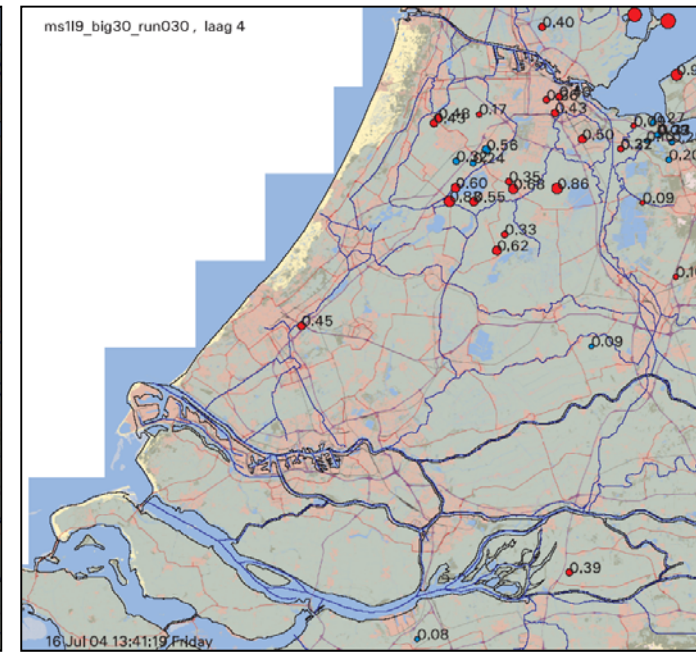
## B.2 Na parameteroptimalisatie



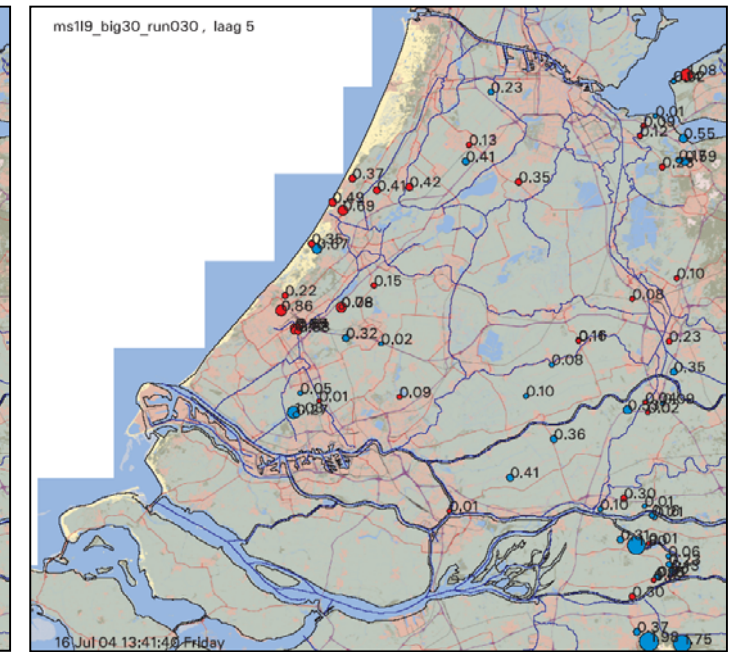
Residuen modellaag 2



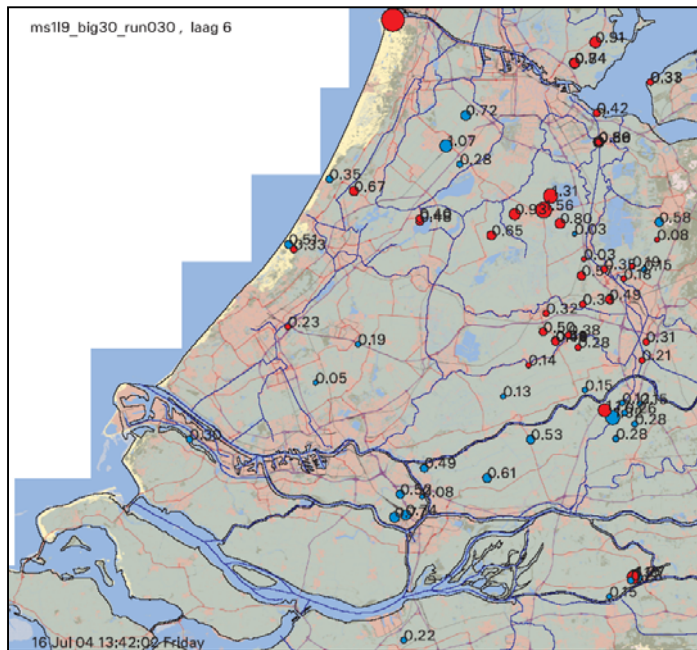
Residuen modellaag 3



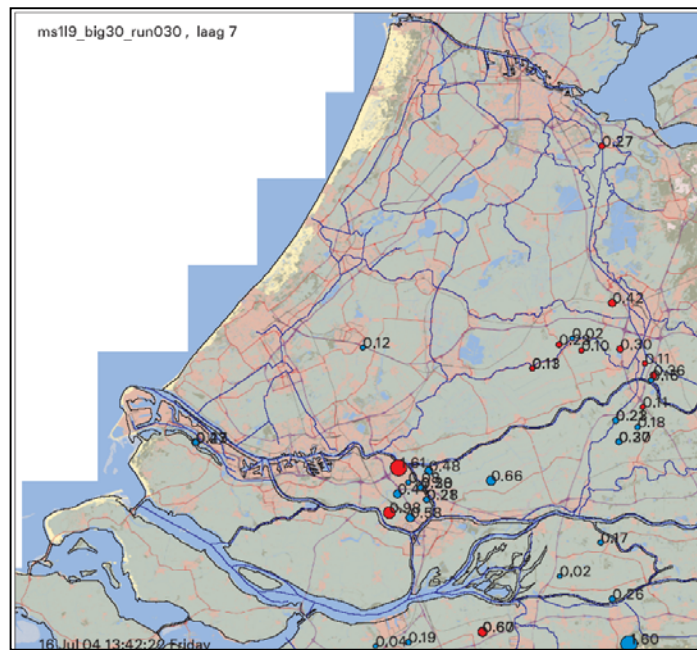
Residuen modellaag 4



Residuen modellaag 5



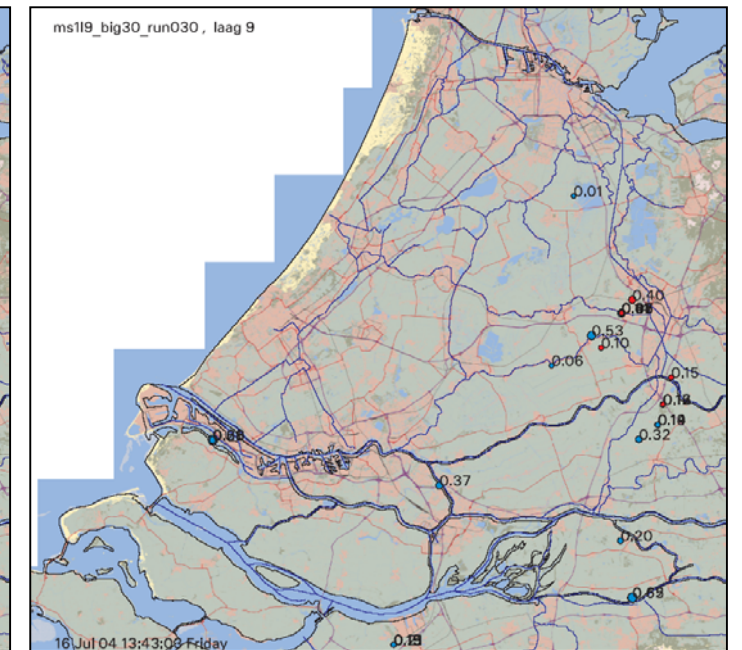
Residuen modellaag 6



Residuen modellaag 7



Residuen modellaag 8



Residuen modellaag 9

- berekend groter dan gemeten
- berekend kleiner dan gemeten

Figuur B2 - Residuen (berekende zoetwaterstijghoogte – gemeten zoetwaterstijghoogte) na parameteroptimalisatie [m].

## C Brijnlozingen

Voor het invoeren van de brijnlozingen in het model is door de provincie Zuid-Holland een schatting gemaakt van het aantal lozers in de glastuinbouw en boomteeltsector, met daarbij de locaties en gemiddelde debieten (tabel C1).

Tabel C1 Gegevens brijnlozingen

Locatie	Aantal lozers	Onttrekkingsdebiet per tuinder (m <sup>3</sup> /jaar)	Lozingsdebiet per tuinder (m <sup>3</sup> /jaar)
Westland	520	10.000	5.000
Gebied tussen Pijnacker, Bergschenhoek, Berkel-Rodenrijs, Bleiswijk en de A12	200	30.000	15.000
Gebied in de driehoek Brielle, Oostvoorne, Tinte	20	50.000	25.000
Het gebied in een straal van 2km rondom Tinte	20	50.000	25.000
Tussen ter Aar en Nieuwveen, langs het Aarkanaal	40	20.000	10.000

Onttrekking vindt plaats in het eerste watervoerend pakket. Lozing vindt plaats in het tweede watervoerend pakket. De concentratie van het geloosde water is gemiddeld tweemaal zo hoog als de concentratie van het onttrokken water.