

Zoutvrachtberekeningen in drie deelgebieden in de zuidwestelijke Delta

Effecten verschillende modelschalen op processen

Gu Oude Essink
Joost Delsman
Peter Vermeulen
Gijs Janssen
Esther van Baaren

1203404-000

Titel

Zoutvrachtberekeningen in drie deelgebieden in de zuidwestelijke Delta

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1203404-000	1203404-000-VEB-0010	43

Trefwoorden

Zuidwestelijke delta, grondwater systeem, zoet-zout, zoutvrachten, verzilting, verzoeting

Samenvatting

Binnen het Deltaprogramma beoogt het deelprogramma Zuidwestelijke Delta o.a. de inventarisatie van risico's en oplossingsrichtingen met betrekking tot de zoetwatervoorziening van dit gebied. Modelberekeningen vormen een belangrijke input voor de probleemdefinitie en uiteindelijke besluitvorming binnen het Deltaprogramma en dus ook voor dit deelprogramma. Voor een schatting van zoutvrachten naar het oppervlaktewatersysteem is gebruik gemaakt van driedimensionale dichtheidsafhankelijke stromingsmodellen van het grondwater systeem. Deze zijn in voortgaande inhoudelijke en technische ontwikkeling. De tot nu toe opgeleverde modellen verschillen in resolutie (ruimtelijk en temporeel), invoerparameters, mate van ijking en dekking gebied.

Het is belangrijk te weten hoe deze verschillende modellen verschillen in hun berekening van de zoutvracht naar het oppervlaktewater, omdat een foutieve schatting van de zoutvracht vergaande gevolgen kan hebben voor de keuzen in oplossingsrichtingen om een (klimaatrobuuste) zoetwatervoorziening te realiseren. Worden detailprocessen in de grovere modellen wel goed meegenomen? Zijn deze detailprocessen op grotere schaal (bijvoorbeeld eilanden) nog van belang, of middelen effecten uit? In hoeverre is een landsdekkend – maar grover – model geschikt om regionale uitspraken te doen? De doelstelling van deze studie is een eerste aanzet te geven tot het beantwoorden van deze vragen, door het vergelijken van de verschillende modellen en modelschalen, en het duiden van de optredende verschillen.

Deze doelstelling is vertaald in de volgende deelvragen:

- Wat is de zoutvracht naar oppervlaktewater in verschillende deelgebieden in de verschillende modellen?
- Hoe groot zijn eventuele verschillen en hoe worden deze veroorzaakt?
- Wat is de zoetwatervoorraad onder percelen in verschillende deelgebieden in de verschillende modellen?
- Hoe groot zijn eventuele verschillen en hoe worden deze veroorzaakt?
- Wat betekenen de resultaten voor het toepassen van 3D dichtheidsafhankelijke grondwatermodellen in zoetwatervoorzieningsstudies?

Om deze deelvragen te kunnen beantwoorden zijn drie sporen gevolgd:

1. Synthetische, fijnschalige numerieke experimenten met een 2D profielmodel. Op deze manier is onderzocht wat theoretisch het effect kan zijn van schaalgrootte op modelresultaten.
2. Vergelijking van modelresultaten zoals berekend voor drie geselecteerde deelgebieden (Tholen/St. Philipsland, Goeree-Overflakkee en West-Brabant) met de verschillende modelinstrumenten die in deze gebieden zijn toegepast. Analyse van de verschillen tussen de resultaten geven inzicht in het effect van met name modelparametrisaties en -schematiseringen op de modeluitkomsten.
3. Op- en neerschaling (met iMOD) van de modellering van Tholen/St. Philipsland. Deze exercities geven inzicht in het effect van (horizontale) modelresolutie op de modelresultaten. De hypothese is dat bij neerschaling grotere zoutvrachten berekend worden, als gevolg van een betere modellering van de opkegeling van diep grondwater onder sloten.

Titel

Zoutvrachtberekeningen in drie deelgebieden in de zuidwestelijke Delta

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst

Project

1203404-000

Kenmerk

1203404-000-VEB-0010

Pagina's

43

De synthetische, numerieke experimenten tonen aan dat detailprocessen rondom een waterloop een belangrijke invloed hebben op de berekening van zoutvracht naar het oppervlaktewater. Het verwachte effect dat een preciezere berekening van de stroombanen leidt tot een betere simulatie van opkegeling onder waterlopen, en daarmee tot een toename van de zoutvracht is in de simulaties aangetoond. Schaalgrootte lijkt daarmee een belangrijke factor in de berekening van de zoutvracht.

Uit het tweede hierboven genoemde spoor blijkt dat verschillende modellen tot sterk verschillende modelresultaten leiden in dezelfde gebieden. De modelresolutie en de eventuele verschillen hierin tussen de modellen spelen daarbij een ondergeschikte rol. De modelresultaten zijn erg gevoelig voor bepaalde keuzes voor modelschematiseringen en parametrisaties. Een hoofdrol is daarbij weggelegd voor de initiële chlorideconcentratie verdeling.

Uit het derde hierboven genoemde spoor blijkt dat bij hogere modelresoluties het Tholen/St. Philipslandmodel, in tegenstelling tot de verwachting, juist lagere zoutvrachten geeft. Dit is te wijten aan een toenemende overschatting van de kwelflux bij afnemende resolutie, wat het gevolg is van het feit dat de opschaling niet geheel correct uitgevoerd wordt. Dit effect domineert in de modelresultaten. De uit het eerste spoor gebleken grote invloed van de modelresolutie is vooralsnog niet gebleken uit de exercities met de verschillende resoluties van het Tholenmodel. Mogelijk is de gesimuleerde periode echter te kort geweest om de effecten goed in beeld te krijgen.

Met de hierboven genoemde resultaten heeft de voorliggende studie de invloed van modelresolutie op zoutvracht aangetoond, en verschillen in berekende zoutvrachten van rond de factor 2 tussen de verschillende regionale modellen zichtbaar gemaakt. In vervolgstudies moeten o.a. de lange termijn effecten van een hogere modelresolutie (zowel in de horizontaal als de verticaal), de initiële chlorideconcentraties en de achtergrond van de verschillen in resultaten tussen de verschillende modellen beter in beeld gebracht worden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	juli 2011	Gu Oude Essink		Perry de Louw		Rinus Vis	
		Joost Delsman					
		Peter Vermeulen					
		Gijs Janssen					
		Esther van Baaren					

Status

definitief

Inhoud

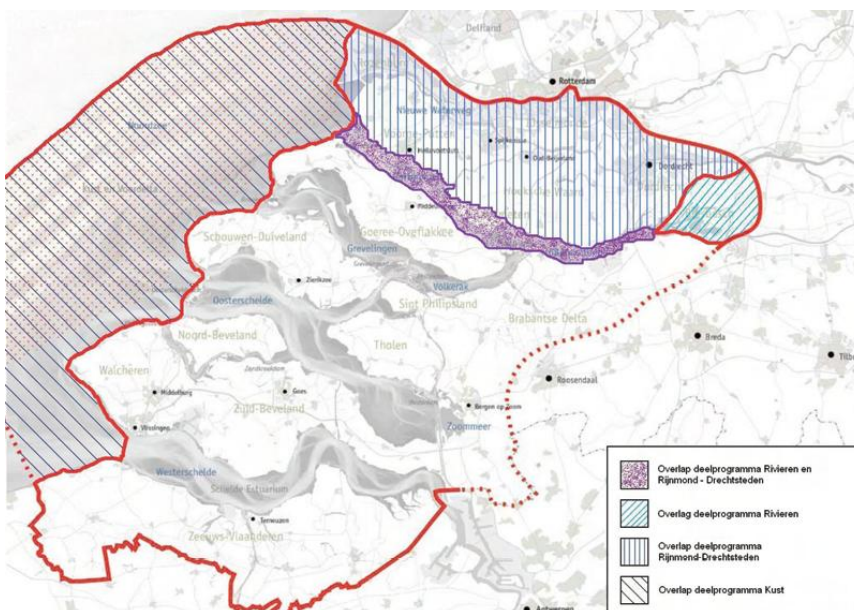
1 Inleiding	1
2 Werkwijze	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Numerieke experimenten met een eenvoudig 2D profielmodel	3
2.3 Selectie deelgebieden	3
2.4 Realisatie deelmodel op verschillende resoluties	5
2.5 Extractie zoutvracht en zoetwatervoorraad	5
2.6 Vergelijking en analyse	6
3 Schaafeffecten in zoet-zout transportmodellering	7
3.1 Numerieke experimenten met een 2D profielmodel	7
3.1.1 Inleiding	7
3.1.2 2D profielmodel	7
3.1.3 Resultaten	8
3.1.4 Synthese	10
3.2 Regenwaterlenzen in landbouwpercelen	10
4 Eigenschappen van de vergeleken modelinstrumentaria	14
4.1 Inleiding	14
4.2 NHI zoet-zout model	14
4.3 Provincie Zuid-Holland model	15
4.4 Zeeland model	17
4.5 Model van Tholen en omgeving	20
5 Resultaten	22
5.1 Vergelijking van de huidige modellen	22
5.2 Verfijning van het Zeeland model in Tholen – St. Philipsland	28
5.2.1 Aanmaken verfijnde ontwatering	28
5.2.2 Resultaten	30
6 Synthese	38
6.1 Discussie en conclusies	38
6.2 Aanbevelingen	39
7 Referenties	41
 Bijlage(n)	
A Korte beschrijving MOCDENS3D	A-1

1 Inleiding

De Zuidwestelijke Delta is het gebied waar de mondingen van de rivieren Rijn, Maas en Schelde samenkomen. De invloed van de zee is er groot, met belangrijke implicaties voor veiligheid en zoetwatervoorziening. Met de realisering van de Deltawerken is niet alleen de veiligheid van het gebied tegen overstromingen, maar ook de zoetwatervoorziening sterk verbeterd. In de noordelijke helft van de Zuidwestelijke Delta wordt zoet water uit gecreëerde zoetwaterbekkens als het Haringvliet en het Volkerak-Zoommeer ondermeer gebruikt om hoogwaardige teelten mogelijk te maken. De zuidelijke eilanden hebben geen toegang tot zoet water uit het hoofdwatersysteem. Hier vindt laagwaardige landbouw plaats, of wordt zoet water betrokken via een landbouwwaterleiding. Door een slechte waterkwaliteit (blauwalgenproblematiek) op de korte termijn, en door klimaatverandering en toename van zoute kwel op de lange termijn, staat de zoetwatervoorziening in de Zuidwestelijke Delta onder druk.

Binnen het Deltaprogramma richt het deelprogramma Zuidwestelijke Delta (Samenvatting plan van aanpak Deelprogramma ZWD, 2010) zich op:

- **De korte termijn:** het samenstellen van een uitvoeringsprogramma, met de volgende ambities voor de Zuidwestelijke Delta:
 - o voldoende beschermd tegen overstromingen, ook wanneer de aarde opwarmt en de zeespiegel stijgt;
 - o ecologisch veerkrachtig door een goede waterkwaliteit en een gezond watermilieu;
 - o vitaal, door herkenbare gebieden, een aantrekkelijke leefomgeving en een sterke regionale economie.
- **De lange termijn:** het in kaart brengen van de gevolgen van klimaatverandering en zeespiegelstijging voor veiligheid en zoet water, en het voorbereiden van 'deltabeslissingen' over oplossingsrichtingen.



Figuur 1: Afbakening gebied deelprogramma Zuidwestelijke Delta

In de 'metastudie' (De Vries, 2009) is de huidige en toekomstige situatie rondom watervraag en wateraanbod in de Zuidwestelijke Delta verkend. De basis voor deze analyse werd gevormd door water- en zoutbalansen van verschillende onderscheiden deelgebieden in de Zuidwestelijke Delta. De metastudie belicht de gebieden in de Zuidwestelijke Delta met een innamemogelijkheid van zoet oppervlaktewater. De studie concludeert ondermeer dat de efficiëntie van het gebruik van dit zoete water erg laag is, en in de toekomst nog meer zal afnemen. De reden hiervoor ligt in de noodzaak tot doorspoelen, omdat de kwaliteit van het regionale water door zoute kwel anders te laag is voor een gebruik als beregeningswater.

Kwantitatieve informatie over de hoeveelheid zoute kwel wordt in de metastudie, en in het deelprogramma Zuidwestelijke Delta, verkregen door modellering van de stroming van zout grondwater, zij het op een grove wijze. Dergelijke driedimensionale, dichtheidsafhankelijke stromingsmodellen zijn in voortgaande inhoudelijke en technische ontwikkeling. Voor de metastudie is gebruik gemaakt van verschillende grondwatermodellen, o.a. het zogenaamde PZH (Provincie Zuid-Holland) -model (Oude Essink *et al.*, 2008), gecombineerd met expert-judgement (De Vries, 2009). Het landelijke deelprogramma Zoetwatervoorziening van het Deltaprogramma zal voor het landsdekkende beeld gebruik maken van het NHI zoet-zout model (Oude Essink en Verkaik, 2010). De Provincie Zeeland heeft het Zeeland model laten ontwikkelen (Van Baaren *et al.*, 2010, in voorbereiding). De modellen verschillen in resolutie (ruimtelijk en temporeel), invoerparameters, mate van ijking en dekkingsgebied.

Als belangrijke input voor de probleemdefinitie en uiteindelijke besluitvorming binnen het Deltaprogramma is het belangrijk te weten hoe deze verschillende modellen verschillen in hun berekening van de zoutvracht naar het oppervlaktewater. Worden detailprocessen in de grovere modellen wel goed meegenomen? Zijn deze detailprocessen op grotere schaal (bijvoorbeeld eilanden) nog van belang, of middelen effecten uit? In hoeverre is een landsdekkend – maar grover – model geschikt om regionale uitspraken te doen? Deze studie geeft een eerste aanzet tot het beantwoorden van deze vragen, door het vergelijken van de verschillende modellen en modelschalen, en het duiden van de optredende verschillen.

2 Werkwijze

2.1 Inleiding

De doelstelling van die onderzoek is vertaald in de volgende deelvragen:

- Wat is de zoutvracht naar oppervlaktewater in verschillende deelgebieden in de verschillende modellen?
- Hoe groot zijn eventuele verschillen en hoe worden deze veroorzaakt?
- Wat is de zoetwatervoorraad onder percelen in verschillende deelgebieden in de verschillende modellen?
- Hoe groot zijn eventuele verschillen en hoe worden deze veroorzaakt?
- Wat betekenen de resultaten voor het toepassen van dichtheidsafhankelijke grondwatermodellen in zoetwatervoorzieningsstudies?

Om deze deelvragen te kunnen beantwoorden is de volgende werkwijze gevolgd.

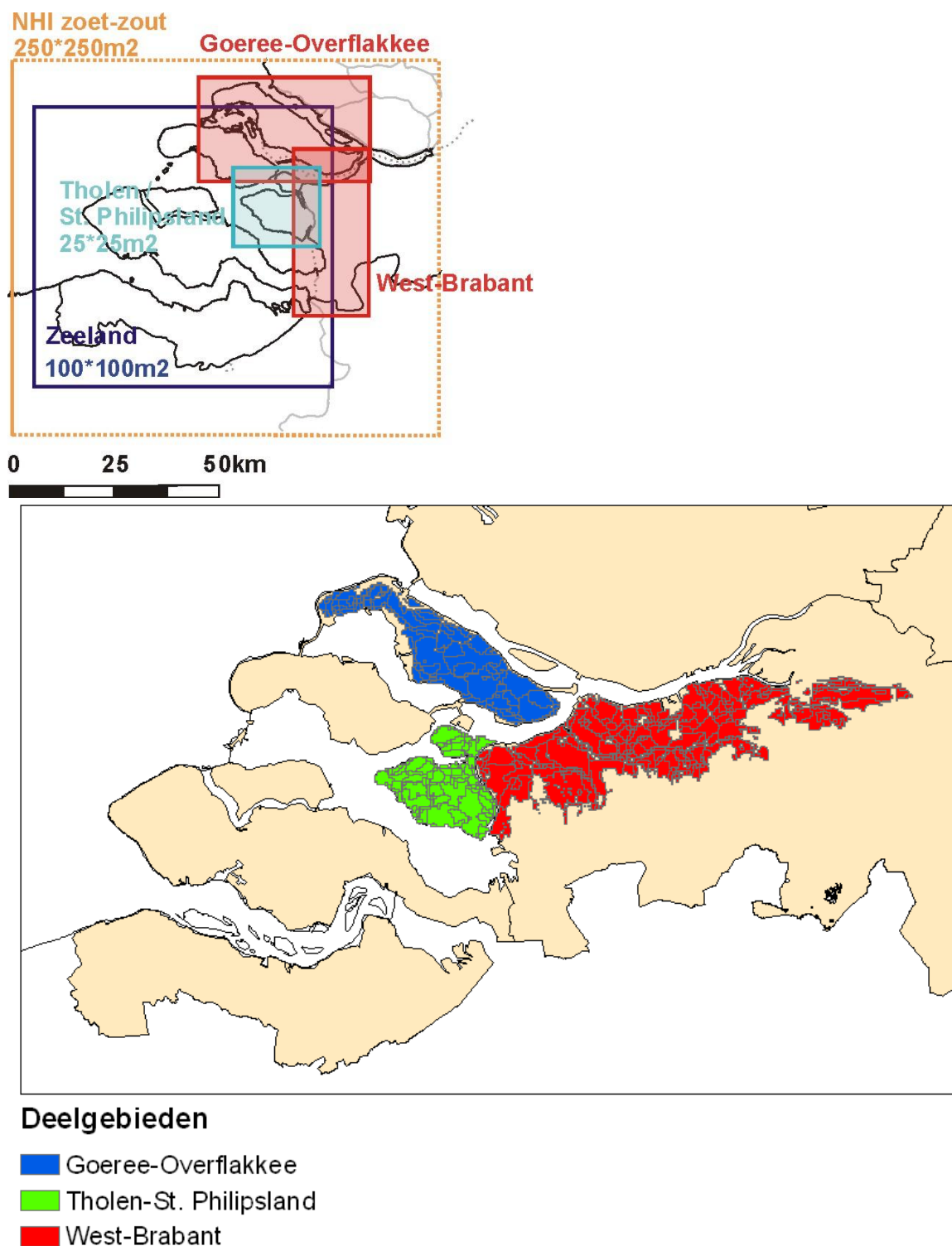
1. Numerieke experimenten met een eenvoudig tweedimensionaal (2D) profielmodel
2. Selectie deelgebieden
3. Realisatie nieuw, verfijnd grondwatermodel voor een deelgebied
4. Extractie zoutvracht en zoetwatervoorraad uit verschillende modellen per deelgebied
5. Vergelijking en analyse

2.2 Numerieke experimenten met een eenvoudig 2D profielmodel

Om meer gevoel te krijgen voor detailprocessen zijn numerieke experimenten uitgevoerd met een eenvoudig 2D profielmodel. Daarbij is gekeken naar processen die de zoutvracht naar oppervlaktewater bepalen en hoe verschillende schaalniveaus uitwerken op de representatie van deze processen in modellen op verschillende schaalniveaus.

2.3 Selectie deelgebieden

Binnen de deelgebieden die zijn geanalyseerd voor de metastudie, is er slechts één deelgebied dat volledig door de verschillende modellen wordt bestreken. Dit deelgebied is Tholen / St. Philipsland. Voor dit deelgebied kunnen het NHI zoet-zout model en het Zeeland model worden vergeleken met de in de metastudie gebruikte resultaten. Dit is dan ook het gebied waarvoor een apart deelmodel is ontwikkeld dat op verschillende resoluties doorgerekend zal worden. Daarnaast worden voor de deelgebieden Goeree-Overflakkee en West-Brabant de door de regionale modellen berekende zoutvrachten vergeleken met die van het NHI zoet-zout model en de metastudie.



Figuur 2: Locaties studiegebied en modellen Zeeland (paars), deel NHI zoet-zout (oranje), en deelgebieden Goeree-Overflakkee (rood), en Tholen/ St. Philipsland (blauw).

2.4 Realisatie deelmodel op verschillende resoluties

Voor het gebied Tholen / St. Philipsland wordt op basis van het Zeeland model zowel een grover als een verfijnd dichtheidsafhankelijk grondwatermodel ontwikkeld.

- Resolutie: in de horizontaal zowel lagere resolutie (250m i.p.v. 100m) als hogere resolutie (25m). In de verticaal is dezelfde resolutie als in het Zeeland model aangehouden.
- Geologie: gelijk aan Zeeland model, door neerschaling af en toe aanpassing nodig
- Maaiveld: gebaseerd op basisgegevens Zeeland model (AHN, 5m)
- Waterlopen: gebaseerd op basisgegevens Zeeland model (Top10, gegevens waterschap). Per lijnelement toegekend voor eenvoudige toekenning aan rekengrid
- Drainage: toegekend op basis van grover resp. verfijnd maaiveld
- Onttrekkingen: gebaseerd op basisgegevens Zeeland model

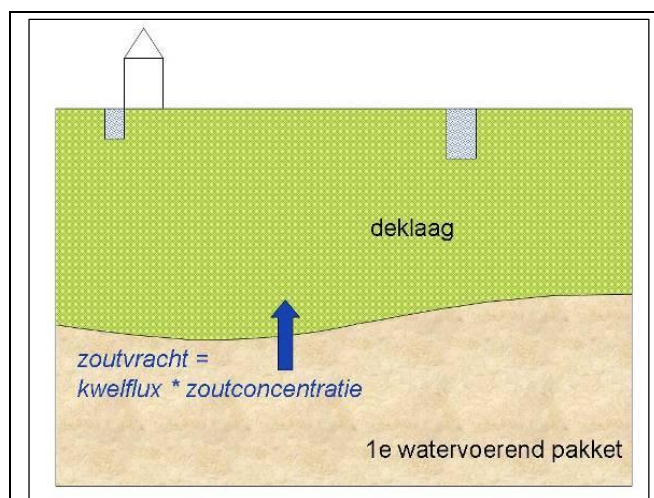
2.5 Extractie zoutvracht en zoetwatervoorraad

Voor de verschillende modellen wordt voor de geselecteerde deelgebieden de gemiddelde zoutvracht en zoetwatervoorraad bepaald voor de huidige situatie.

De zoutvracht van het grondwatersysteem naar het oppervlaktewatersysteem is gedefinieerd als (Figuur 3):

$$\text{zoutvracht} = \text{kwelflux} * \text{chlorideconcentratie grondwater}$$

De resultaten van de chlorideconcentratie, kwel en zoutvracht worden weergegeven aan de onderkant van de deklaag indien de deklaag aanwezig is. De aanname hierbij is dat de kwelflux en bijbehorende zoutvracht die door de deklaag stroomt uiteindelijk voor het grootste deel in het oppervlaktewatersysteem terecht komt. Weliswaar niet direct door de buffering van het grondwatersysteem, maar wel uiteindelijk. De gemiddelde zoutvracht per deelgebied wordt bepaald door de resultaten te middelen over het kwellende gebied, de infiltrerende gebieden worden dus niet meegenomen.



Figuur 3: Definitie van de zoutvracht van het grondwatersysteem naar het oppervlaktewatersysteem.

Als maat voor de zoetwatervoorraad is de dikte van de grondwaterkolom boven het grensvlak 1500 mg/L aangehouden. De concentratie 1500 mg/L wordt door de provincie Zeeland aangehouden als grens tussen zoet en zout water ("landbouwkundig zoet").

2.6 Vergelijking en analyse

De analyse is er met name ook op gericht om uit de resultaten 'richtlijnen voor het gebruik' van zoetzout grondwatermodellen af te leiden. Dat is (wellicht) een brug te ver op basis van deze vergelijking, maar zou erg helpen in de verschillende lopende studies waarvoor deze modellen een belangrijk invoergegeven zijn. Belangrijk aandachtspunt daarbij is bijvoorbeeld of de soms sterk regionale problematiek en oplossingsrichtingen in grovere modellen voldoende worden gesignaleerd. Geldof (2010) schreef recent in H2O nog een interessant opinieartikel over complexiteit in het waterbeheer. Hij beschrijft hierin het verloren gaan van door modellen uitgesloten processen in het besluitvormingsproces.

3 Schaaleffecten in zoet-zout transportmodellering

3.1 Numerieke experimenten met een 2D profielmodel

3.1.1 Inleiding

Inherent aan modellering is het vereenvoudigen van de complexe werkelijkheid. Dat gebeurt in numerieke modellen door de werkelijkheid te vatten in wiskundige vergelijkingen en deze te vullen met parameters op een rekengrid. Hoe fijner het rekengrid, hoe fijner variaties in parameters kunnen worden opgegeven, en hoe gedetailleerder de wiskundige vergelijkingen kunnen worden opgelost. Helaas heeft verfijning van het rekengrid een sterke toename in rekentijd – en het aantal benodigde parameters – tot gevolg, waardoor numerieke modellen schipperen tussen gewenst en daadwerkelijk toegepast schaalniveau.

Uit de wetenschappelijke literatuur is al het een en ander bekend over deze schaalproblematiek. Zo toonde De Lange (1998) aan dat bij stroming naar waterlopen de weerstand binnen in een opgeschaalde cel bij opschaling moet worden verdisconteerd in de weerstand naar de waterlopen, om een goede flux naar de waterloop te berekenen. Vermeulen *et al.* (2006) stelt dat de opschaling van de oppervlaktewater-randvoorwaarde in de Nederlandse situatie veel belangrijker is dan het opschalen van transmissiviteiten. Haitjema *et al.* (2001) hebben specifiek gekeken naar de berekening van stroombanen naar waterlopen bij verschillende celgrootten in MODFLOW. Zij stellen dat voor het adequaat berekenen van stroombanen naar een vrij in het model liggende waterloop als vuistregel zo'n 8 á 10 modelcellen nodig zijn.

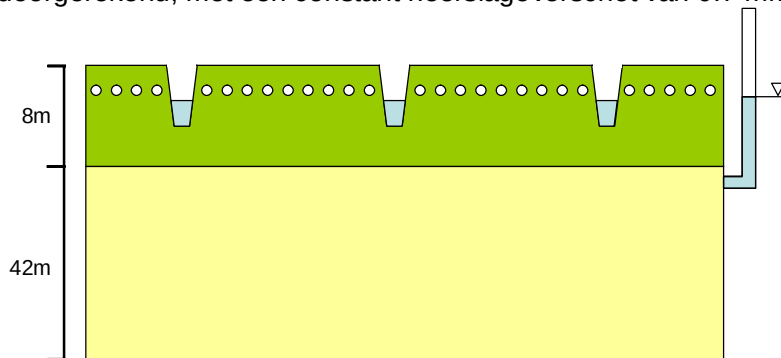
Het niet goed representeren van stroombanen (het gevolgde traject van een waterdeeltje) en snelheden zorgt voor problemen bij transportmodellering. Bij reactieve stoffen is het belangrijk goed te weten a) hoe lang stoffen bloot staan aan reacties en b) welke bodemkarakteristieken de stof op zijn weg tegen komt. Nu is chloride geen reactieve maar een conservatieve stof, en is het voor de berekening van de zoutvracht niet per se interessant waarlangs water stroomt. Wel is het zo dat de chlorideconcentratie in het watervoerende pakket (de bron van de zoutvracht) niet homogeen is. Door dichtheidsverschillen neemt de zoutconcentratie over het algemeen toe met de diepte. De hypothese is dat een goede berekening van stroombanen ook voor het bepalen van de zoutvracht naar oppervlaktewater van belang is, doordat bij verschillende stroombanen ander (dieper of ondieper, en dus zouter of minder zout) naar de waterloop stroomt. Met een eenvoudig 2D profielmodel wordt gekeken of dit effect inderdaad leidt tot verschillen in zoutvrachten.

3.1.2 2D profielmodel

Met een 2D profielmodel is onderzocht wat theoretisch het effect kan zijn van schaalgrootte op modelresultaten. Dit 2D profielmodel bestaat uit 3 evenwijdige sloten, liggend in een deklaag boven een watervoerend pakket (Figuur 4). Tussen de sloten bevinden zich drains op gelijke afstanden. Met de hydraulische eigenschappen van de deklaag en het watervoerend pakket, de stijghoogte in het watervoerend pakket en de hoogten van het waterniveau in de sloot en de ligging van de drains kan worden gevarieerd. In het watervoerend pakket is het grondwater vanaf het begin brak tot zout. Het zoutgehalte loopt op met de diepte, tot uiteindelijk 16000 mg/L op 50 m beneden maaiveld.

Dit systeem is gemodelleerd met SEAWAT – een code om dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport te modelleren op basis van MODFLOW en

MT3D (Langevin *et al.*, 2007). Deze code is sterk vergelijkbaar met MOCDENS3D (Oude Essink, 1998) dat wordt gebruikt voor de verschillende vergeleken modellen (Hoofdstuk 4). De celgrootte is gevarieerd van in het uiterste geval 50 cm in de x-richting, tot 25m in de x-richting. Het basismodel kent een horizontale hydraulische doorlatendheid k_h in de deklaag van 0.1 m/d, en 8 m/d in het watervoerend pakket, met een anisotropie van 3. Intreeweerstand van de waterlopen is 1 dag, van de drains 0.5 dagen. Deze waarden zijn in de verschillende simulaties gevarieerd. Het model is in alle gevallen 1000 dagen doorgerekend, met een constant neerslagoverschot van 0.7 mm/d.



Figuur 4: Schematisatie 2D profielmodel

Met dit 2D profielmodel zijn de volgende scenario's doorgerekend:

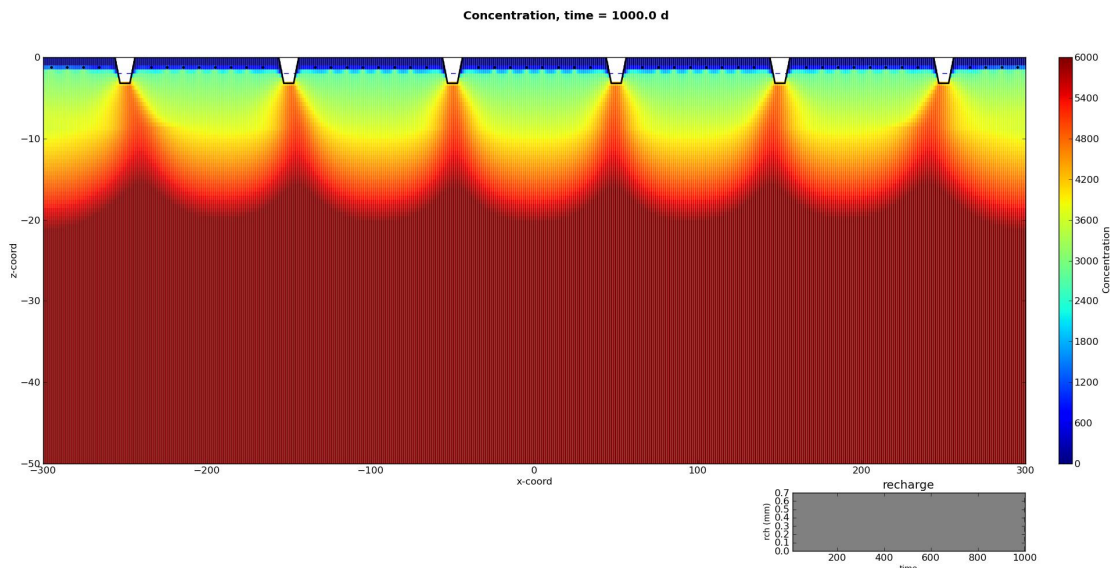
- lichte kweldruk (stijghoogte watervoerend pakket net boven drains)
- sterke kweldruk (stijghoogte watervoerend pakket gelijk aan maaiveld)
- regionale stroming afwezig (stijghoogte watervoerend pakket op slootniveau)
- infiltratie (stijghoogte watervoerend pakket een meter onder slootniveau)

Tevens zijn twee verschillende karakteristieken van de deklaag geschematiseerd. In beide gevallen bedraagt de horizontale doorlatendheid k_h 0.1 m/d. De verticale doorlatendheid k_v is gevarieerd van 0.033 m/d (anisotropie 1/3) in het ene geval, tot 0.01 m/d (anisotropie 1/10) in het tweede geval.

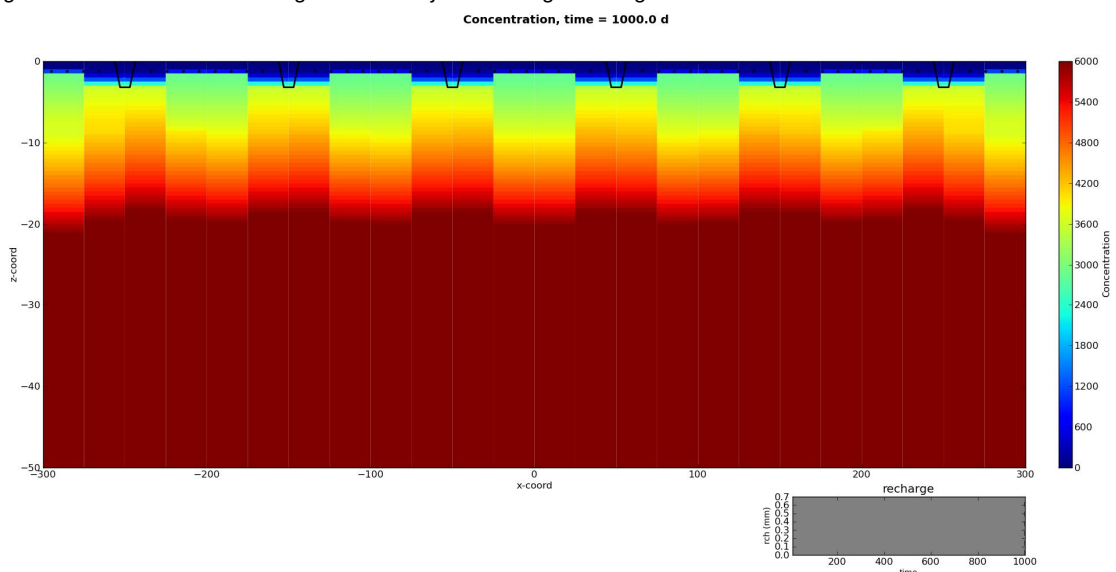
3.1.3 Resultaten

Figuur 5 en Figuur 6 laten de chlorideconcentratie in de ondergrond zien na 1000 dagen rekenen met een constant neerslagoverschot van 0.7 mm/d. De kweldruk in het watervoerend pakket is -1 m onder maaiveld, en ligt daarmee net boven het drainagebuis-niveau (-1.2 m). In Figuur 5 is gerekend met een horizontale celgrootte van 0.5 m, in Figuur 6 met een horizontale celgrootte van 25 m. De verticale resolutie is in beide modellen gelijk, namelijk 0.5 m. De invloed van de sloten en de drainagebuizen is zo opgeschaald, dat de flux naar de waterlopen en de drainagebuizen in beide gevallen min of meer gelijk is (1.41 om 1.17 mm/d naar de waterlopen en 0.45 om 0.40 mm/d naar de drains in het fijne en het opgeschaalde grove model, resp.). Dit lukt zonder uitgebreide iteratieve methode niet exact, in totaal verschilt de flux naar waterlopen en drains dan ook zo'n 15%. Dit water is volledig afkomstig van toegenomen kwel, immers, de neerslaghoeveelheid is in beide simulaties gelijk.

De berekende zoutvracht naar de sloten en drainagebuizen neemt sterker af. De zoutvracht is in het fijne model 5,0 kg/m²/d, in het grove 3,7 kg/m²/d, een afname van 27 %. In de figuren is goed te zien waar dit door veroorzaakt wordt: de zoutconcentratie onder de sloten is in het grove model minder hoog dan in het fijne model: de opkegeling van zout water wordt minder goed gemodelleerd. De opkegeling van zout water onder de waterlopen komt doordat de kwelflux in het fijne model minder wordt uitgesmeerd, en daardoor hogere snelheden bereikt dan in het opgeschaalde grove model. Dergelijke opkegelingen van brak-zout grondwater zien we ook terug in perceelsmetingen in Zeeland (Oude Essink *et al.*, 2009).



Figuur 5: Chlorideconcentratie grondwater bij berekening met celgrootte van 0.5m horizontaal en 0.5m verticaal



Figuur 6: Chlorideconcentratie grondwater bij berekening met celgrootte van 10m horizontaal en 0.5, verticaal

Het 2D profielmodel is doorgerekend voor twee verschillende combinaties van hydraulische deklaagparameters en stijghoogte in het watervoerend pakket. Binnen deze studie was het niet mogelijk een bredere range aan situaties te beschrijven. Voordat de conclusies gegeneraliseerd worden is het echter wel noodzakelijk dit te doen. De resultaten (Tabel 1) laten zoals verwacht een sterke toename zien van de zoutvracht bij toename van de kweldruk. Daarnaast blijkt de zoutvracht in de opgeschaalde grove berekeningen in een kwelsituatie zo'n 15 tot 40% kleiner te worden berekend dan in het fijne model. In de situatie zonder regionale stromingscomponent geeft het grovere model juist een grotere zoutvracht. Dit kan komen doordat door de grovere schematisatie de gekromde stroombanen rondom de sloot niet kunnen worden berekend: water dat tussen de sloten infiltreert, stroomt daarom vaker via het watervoerend pakket dan in de fijnere situatie, wat een toegenomen zoutvracht tot gevolg heeft.

Tabel 1: vergelijking zoutvracht ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{d}$) tussen fijn en opgeschaald grof model in simulaties met verschillende hydrogeologische omstandigheden.

Zoutvracht [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{d}$]					
Hydrogeologische situatie	Stijghoogte in WVP	$k_h = 0.1, k_v = 0.033, \sqrt{kDc} = 14\text{m}$		$k_h = 0.1, k_v = 0.01, \sqrt{kDc} = 25\text{m}$	
		$\Delta x = 0.5\text{ m}$	$\Delta x = 25\text{ m}$	$\Delta x = 0.5\text{ m}$	$\Delta x = 25\text{ m}$
Infiltratie	$\phi = -3\text{m}$	0	0	0	0
Geen reg. stroming	$\phi = -2\text{m}$	0.31	0.39 (+25%)	0.38	0.46 (+22%)
Matige kwel	$\phi = -1\text{m}$	5.08	3.70 (-27%)	2.17	1.80 (-17%)
Sterke kwel	$\phi = 0\text{m}$	17.24	11.20 (-35%)	5.97	3.81 (-36%)

3.1.4 Synthese

Zoals uit de resultaten blijkt heeft de gebruikte celgrootte in een dergelijk geïdealiseerd 2D profielmodel een duidelijke invloed op de berekende concentratieverdeling. Ook wanneer de opschaling zo plaatsvindt dat zowel de stijghoogteverdeling als de fluxen naar de waterlopen en drainagebuizen aardig overeen komen, worden er verschillen van 17 tot 36% geconstateerd in de berekende zoutvracht. De range aan hydraulische deklaagparameters is te klein om generieke conclusies te verbinden aan de opgetreden verschillen tussen de beschouwde situaties. Ook de invloed van de verdeling van chlorideconcentratie in het watervoerend pakket is niet onderzocht.

Opvallend is wel dat al bij een opschaling naar 25m de opkegeling onder een sloot nog maar beperkt zichtbaar is. Deze resolutie wordt bij steeds meer regionale kwantiteitsmodellen toegepast, maar is voor dichtheidsafhankelijke modellen vooralsnog nog een technisch onhaalbare resolutie. Hieruit zou de conclusie kunnen worden getrokken dat de huidige regionale dichtheidsafhankelijke modellen – met nog grotere celgrootten – de zoutvracht naar het oppervlaktewater onderschatten. Hiervoor is het beschreven geval echter te specifiek en kunnen de getoonde effecten in werkelijkheid uitmiddelen.

Wellen

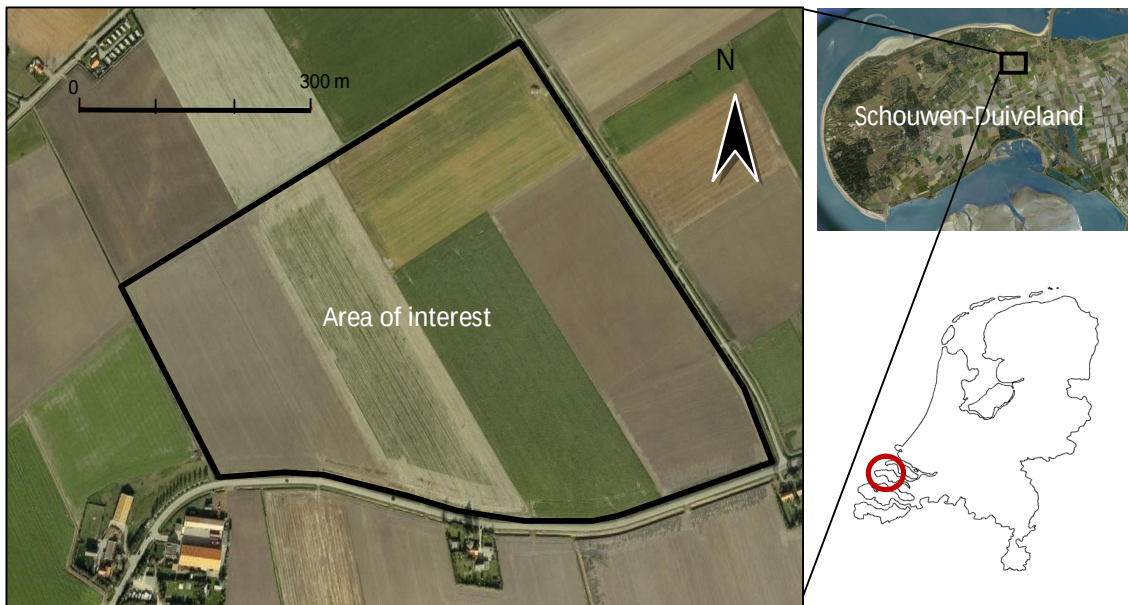
Een specifiek geval dat hier niet is bekeken, maar toch niet onbesproken mag blijven, is het voorkomen van wellen. Dit is in de Zuidwestelijke Delta niet aan de orde, maar een veelvoorkomend verschijnsel in de diepe droogmakerijen in Noord en Zuid Holland. Wellen zijn kortsluitingen tussen het watervoerend pakket en de sloot, veelal ontstaan door opbarsting. Doordat de hydraulische weerstand hier zo goed als afwezig is, worden wellen gekenmerkt door een geconcentreerde kwelflux, met zeer hoge snelheden. Feitelijk is hier sprake van een extreem geval van de hier beschouwde situaties. Door opkegeling zijn de zoutconcentraties in wellen flink hoger dan in de diffuse kwel in de omgeving. Voor meer informatie over wellen zie ondermeer De Louw et al. (2010).

Met de zeer beperkte range aan geanalyseerde situaties is het niet mogelijk generieke conclusies te trekken over de effecten van schaalgrootte op de berekening van de zoutvracht. Wel is duidelijk dat detailprocessen rondom waterlopen in bepaalde situaties grote invloed kunnen hebben op zoutvracht naar het oppervlaktewater. Onduidelijk is vooralsnog in welke situaties dit meer dan wel minder speelt, en hoe dit effect zich verhoudt tot de overige onzekerheden in regionale modellen.

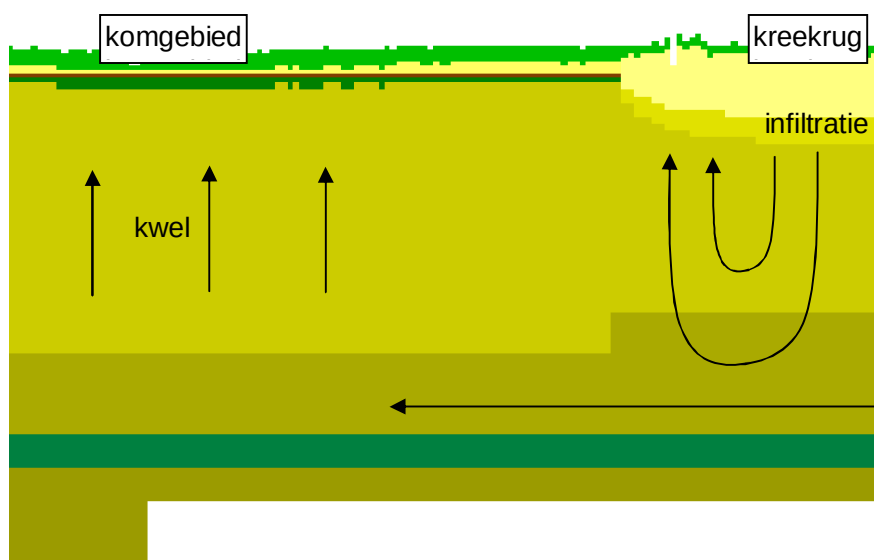
3.2 Regenwaterlenzen in landbouwpercelen

Voortman (2010) heeft voor een perceel op Schouwen-Duiveland onderzocht wat het effect is van celgrootte op de berekende zoetwaterlens onder het perceel. Het studiegebied betreft

een gebied van 500x300 m, met een interessante geologische opbouw. Het gebied ligt namelijk op de overgang van een kreekrug naar het komgebied. De maaiveldverschillen zijn gering (~1m), maar wel bepalend voor de optredende hydrogeologie. Op de zandige, wat hoger liggende kreekrug vindt infiltratie plaats, zoet regenwater vormt hier een dikke regenwaterlens. In het komgebied kwelt juist zout water omhoog, hier is de zoetwaterlens erg dun (Figuur 8).



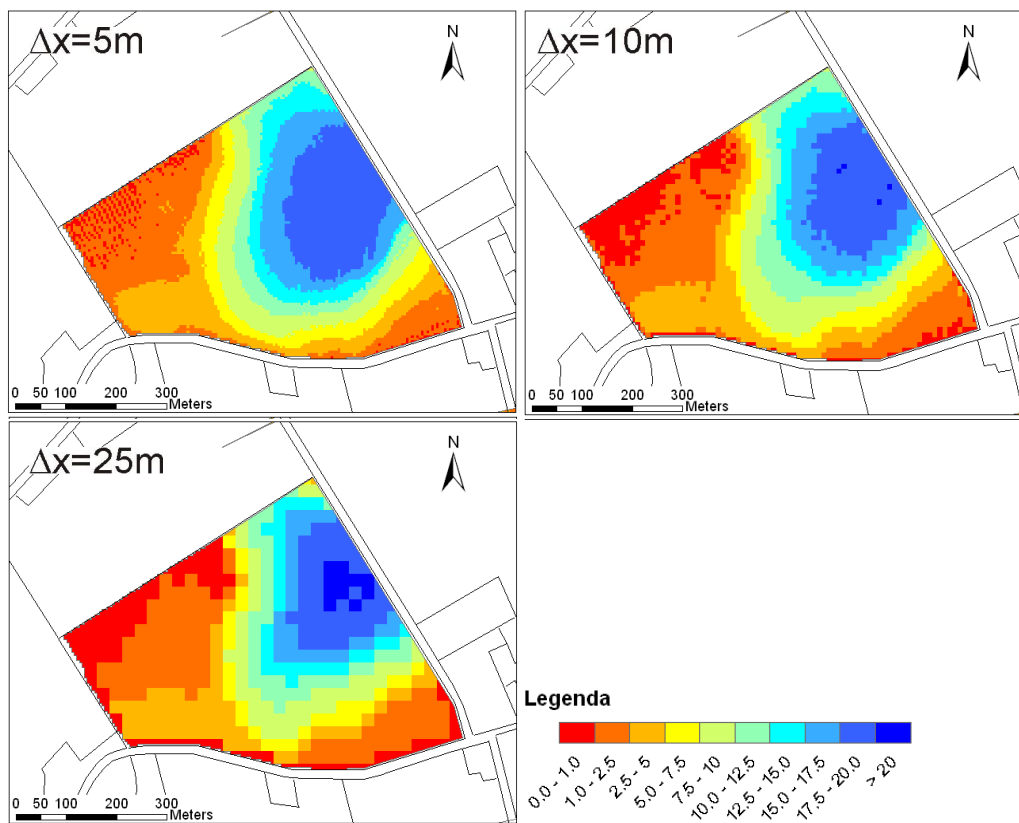
Figuur 7: Locatie studiegebied op Schouwen-Duiveland (Voortman, 2010)



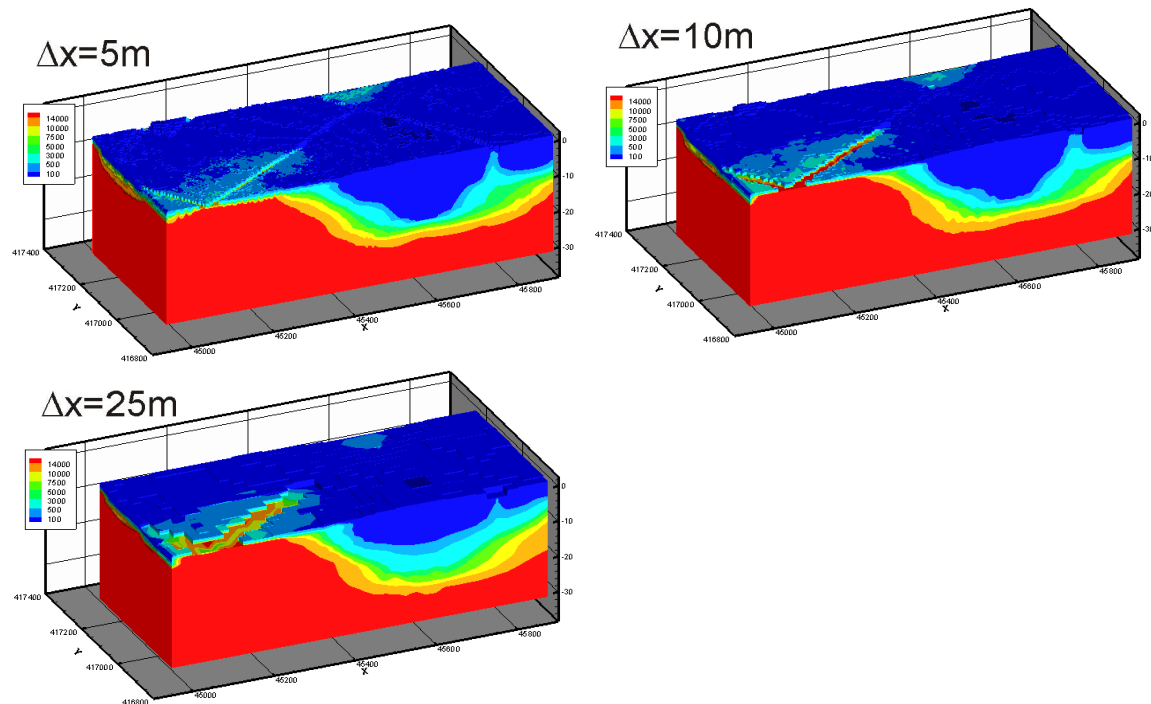
Figuur 8: Globale (geo-)hydrologische situatie, met infiltratie op de zandige (gele tinten) kreekrug, en kwel in het kleiige komgebied

Voortman (2010) weet de in het veld gemeten chlorideconcentraties in het grondwater goed te benaderen met een dichtheidsafhankelijk grondwatermodel. Hij gebruikt hiervoor een model met een hoge resolutie, $5 \times 5 \text{ m}^2$ in de horizontaal. Hij heeft vervolgens onderzocht wat

de invloed van celgrootte is op zijn berekende zoetwatervoorraad. Hij heeft het model opgeschaald van $5 \times 5 \text{ m}^2$ naar $10 \times 10 \text{ m}^2$ en vervolgens naar $25 \times 25 \text{ m}^2$ (Figuur 9, Figuur 10).



Figuur 9: Diepte brak-zout grensvlak (3000 mg/L) op verschillende modelschalen (5m, linksboven, 10m rechtsboven, 25m linksonder)



Figuur 10: Chlorideconcentraties in het grondwater op verschillende modelschalen (5m, linksboven, 10m rechtsboven, 25m linksonder)

Uit de resultaten blijkt dat de vorm van de regenwaterlens voor de verschillende simulaties hetzelfde blijft bij het gebruik van een celgrootte van $10 \times 10 \text{ m}^2$ en $25 \times 25 \text{ m}^2$: ondiep in het komgebied, diep op de kreekrug. Als met een rastercel grootte van $5 \times 5 \text{ m}^2$ wordt gerekend is zelfs de ligging van drainage buizen in het komgebied zichtbaar (Figuur 9, links bovenin). Bij een vergroting van de celgrootte verdwijnt dit contrast. De dikke lens in de kreekrug wordt dieper bij een lagere resolutie. Het volume water met een chlorideconcentratie lager dan 3000 mg/L neemt bij een celgrootte van $10 \times 10 \text{ m}^2$ 10% af, bij een rastercel grootte van $25 \times 25 \text{ m}^2$ is dit volume 18% kleiner. Deze afname van het volume vindt voornamelijk plaats in het grensgebied tussen de kreekrug en het komgebied, waar het brak-zout grensvlak op 7.5 tot 15 m diepte ligt (Voortman, 2010).

Uit de resultaten van Voortman (2010) blijkt daarmee dat het op een modelschaal van $25 \times 25 \text{ m}^2$ mogelijk is om de zoetwatervoorraad goed in beeld te brengen. Hierbij moet aangetekend worden dat: a) $25 \times 25 \text{ m}^2$ nog altijd behoorlijk fijner is dan de beschikbare regionale modellen (Zeeland model is $100 \times 100 \text{ m}^2$ en NHI zoet-zout model is $250 \times 250 \text{ m}^2$), en nog niet bekend is hoe een grovere schaal uitwerkt op de resultaten, b) dit model een beperkt gebied en daarmee beperkte range aan voorkomende hydrologische situaties beschrijft.

4 Eigenschappen van de vergeleken modelinstrumentaria

4.1 Inleiding

De drie vergeleken modelinstrumenten kennen door verschillen in de doelstelling van de modellen, wensen van opdrachtgevers en voortschrijdend inzicht verschillen in aannamen, conceptualisatie, invoergegevens en celgrootte. Deze verschillen zijn van invloed op de vergelijking van deze modellen, en worden daarom in dit hoofdstuk op een rij gezet.

4.2 NHI zoet-zout model

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

Het zoet-zout instrumentarium kan ingezet worden:

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

Zie Oude Essink en Verkaik (2010), <http://www.nhi.nu> en wiki-site <http://zoetzout.deltares.nl> voor aanvullende informatie.

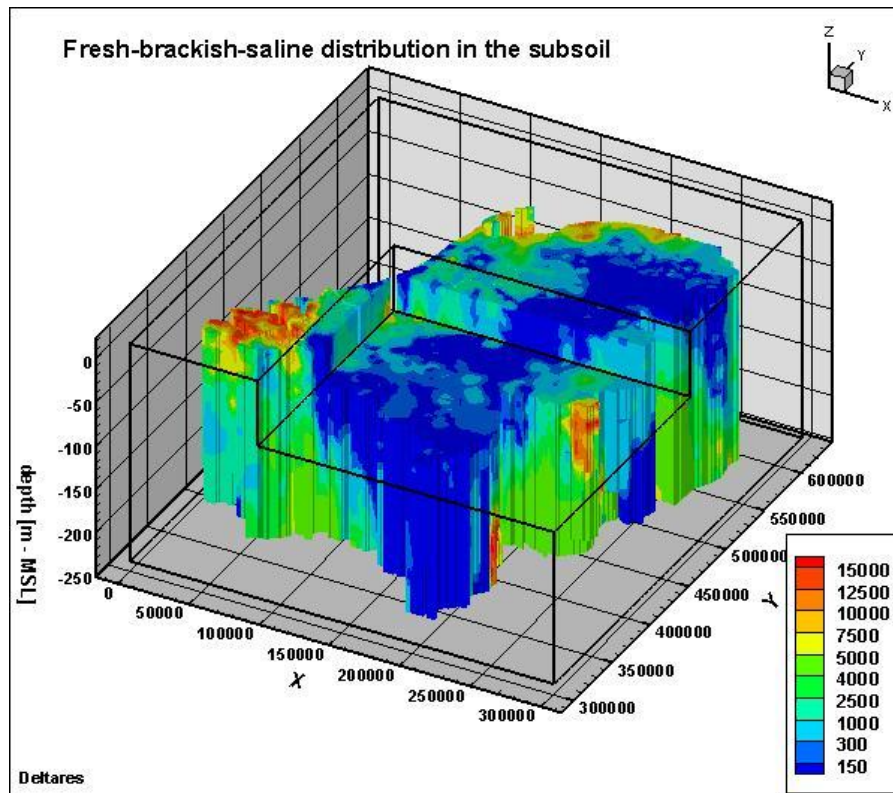
Technische specificaties

Eigenschappen van het NHI zoet-zout model zijn:

- 3D, niet-stationair voor zouttransport
- dichtheidsgedreven grondwaterstroming
- gekoppeld stoftransport (zowel advection als dispersief transport)
- geheel laag Nederland ~25000 km²
- celgrootte 250x250m²
- 31 modellagen van 1200x1300 modelcellen
- verschillende tijdschalen mogelijk: jaarlijks/ seizoenaal/maandelijks/decades
- NHI geologie, versie 2.0
- simulaties van 100 jaar

Het 3D initiële zoet-brak-zout veld (Figuur 11) is bepaald aan de hand van verschillende databanken, zoals chlorideconcentratie analyses, VES metingen en boorgatmetingen (Oude Essink *et al.*, 2005). Er is gebruik gemaakt van ZZRegis (Kloosterman, 2007). Via een geostatistische methode is een 3D veld gegenereerd (Pebesma, 2009, Goes *et al.*, 2009). Vervolgens is het numerieke model gebruikt om na een simulatie van 30 jaar te komen tot

een meer gestroomlijnde dichtheidsverdeling, waar de grootste numerieke inversies uit zijn gefilterd. De aldus gecreëerde zoet-brak-zout verdeling dient als basis voor de verdere berekeningen.



Figuur 11: 3D chloride verdeling in de Nederlandse ondergrond.

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

- chlorideconcentraties in de ondergrond,
- kwel- en infiltratiefluxen,
- zoetwaterstijghoogten¹,
- zoutvrachten naar het oppervlaktewater systeem, en
- volumes zoet grondwater.

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

4.3 Provincie Zuid-Holland model

De voornaamste doelstelling van de bouw van het PZH (Provincie Zuid-Holland) model was 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

¹ Zie voor betekenis zoetwaterstijghoogte: Santing (1980), Oude Essink (2001a) of Post *et al.* (2007).

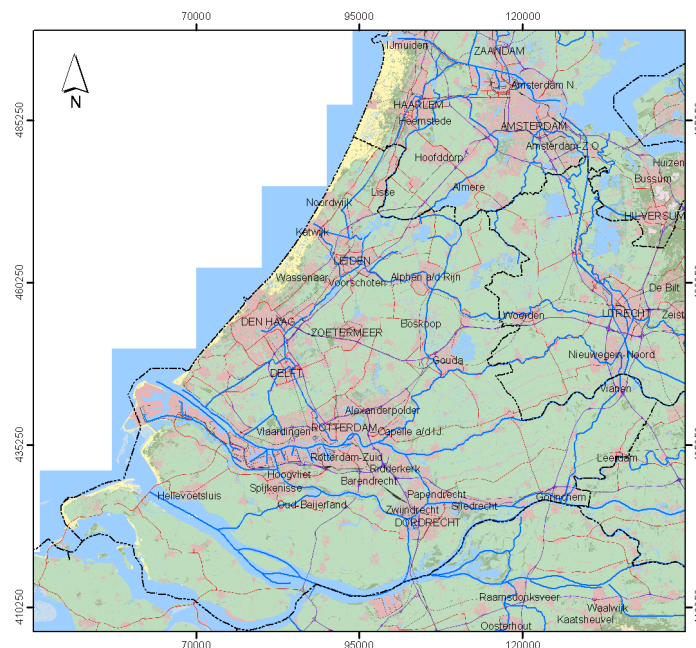
(Minnema *et al.*, 2004; Oude Essink *et al.*, 2010b). Het model richt zich op de verzilting van het grondwater binnen de watervoerende pakketten. De doelstelling van de modelbouw bestond uit de beantwoording van de volgende vragen:

1. Hoeveel zoet grondwater is er aanwezig in Zuid-Holland?
2. Met welke snelheid verzilt het grondwater in Zuid-Holland (in verschillende scenario's)?
3. Met welke snelheid neemt de omvang van de voorraad zoet grondwater af/toe (in verschillende scenario's)? 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 (in verschillende scenario's)?

Technische specificaties

Eigenschappen van het PZH model zijn:

- 3D, niet-stationair voor zouttransport
- dichtheidsgedreven grondwaterstroming
- gekoppeld stoftransport (zowel advectioneel als dispersief transport)
- gebied rondom de provincie Zuid-Holland (zie Figuur)
- celgrootte 250x250m²
- 40 modellagen van 370x400 modelcellen
- modelceldikten van 5 (de bovenste 20 lagen) en 10 (de onderste 20 modellagen) meter.
- gecalibreerd op zoetwaterstijghoogten (Oude Essink *et al.*, 2010b)
- variabelen die op te leveren zijn (als een functie van de tijd): kwel, chlorideconcentraties, zoutvrachten naar het oppervlaktewatersysteem, volumes zoet grondwater, stijghoogten in watervoerende pakketten
- simulaties tot 200 jaar



Figuur 12: Dekking van het PZH model.

De initiële chlorideconcentratie verdeling van het PZH model is geconstrueerd aan de hand van chlorideconcentraties in peilbuizen in het gebied gemeten over de periode 1867-2001 (DINO (1999) en LGM en PGM bestanden provincie Zuid-Holland). Met deze gegevens is een driedimensionale interpolatie uitgevoerd. Er zijn 5772 recente chlorideconcentratie metingen in de Provincie Zuid-Holland gebruikt om de driedimensionale initiële dichtheidsmatrix te bepalen.

4.4 Zeeland model

Het Zeeland model is recent ontwikkeld om de huidige én toekomstige verzilting en verzoeting van het freatische grondwater in de provincie Zeeland te kunnen kwantificeren, onder invloed van een zeespiegelstijging, bodemdaling, en een veranderend neerslag- en verdampingspatroon. Het instrument dient tevens geschikt te zijn om effecten van technische maatregelen ter bestrijding van verzilting te analyseren en kwantificeren. Het instrumentarium wordt uitgebreid beschreven door Van Baaren et al (2011, in voorbereiding).

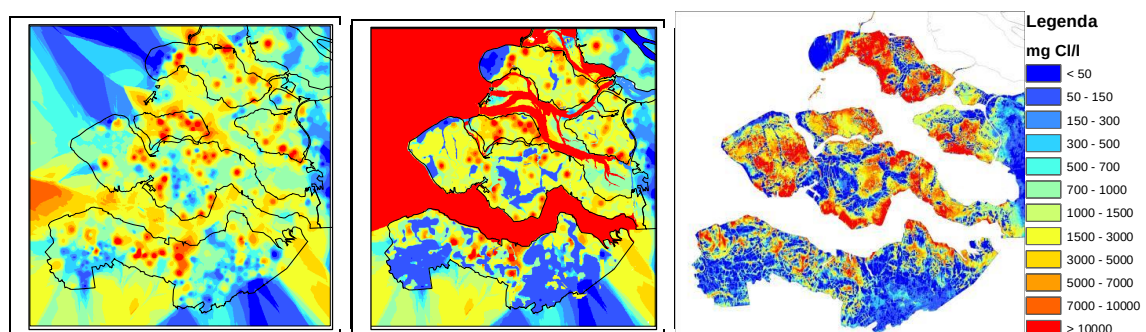
Technische specificaties

Eigenschappen van het Zeeland model zijn:

- 3D, niet-stationair voor zouttransport (maandelijks/seizoenaal)
- dichtheidsgedreven grondwaterstroming
- gekoppeld stoftransport (zowel advectioneel als dispersief transport)
- gebied rondom de provincie Zeeland
- celgrootte: 100x100m² schaal
- 40 modellagen van 700x670 modelcellen
- modelceldikten variërend van 0.5m tot 10m
- gecalculeerd op stijghoogten
- variabelen die op te leveren zijn (als een functie van de tijd): kwel, chlorideconcentraties, zoutvrachten naar het oppervlaktewatersysteem, volumes zoet grondwater, stijghoogten in watervoerende pakketten
- simulaties van 100 jaar

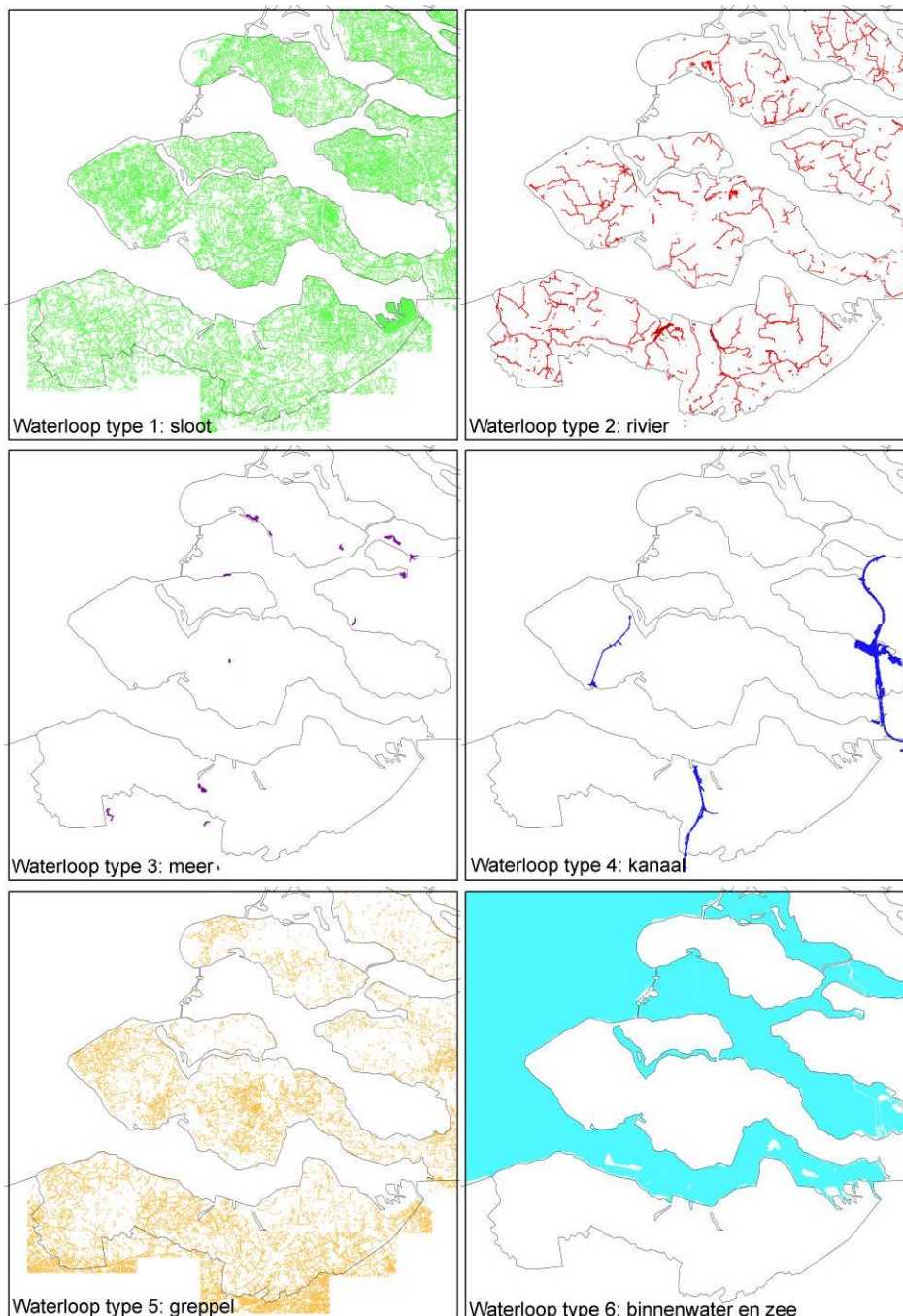
De huidige situatie (het jaar 2010) van de 3D chlorideconcentratie verdeling van het grondwater is bepaald in een drietal stappen:

1. ruimtelijke interpolatie van alle beschikbare chloridemetingen in het modelgebied (Figuur 13a); (Pebesma, 2009)
2. toevoegen zoet-brak en brak-zout grensvlakken en inversies van REGIS zoetzout (REGIS Zeeland: Goes en Vernes, 2006; Goes et al., 2009) en chlorideconcentraties in en onder oppervlaktewater (Figuur 13b);
3. modelleren geschiedenis en extra interpolatie door het numerieke grondwatermodel.



Figuur 13: Resultaat stappen 1 (links), 2 (midden) en 3 (rechts) in bepaling chlorideconcentratie verdeling in de ondergrond, voor modellaag 15, 6.5m beneden NAP (gebaseerd op Van Baaren et al., 2011, i.v.)

De ligging van oppervlaktewater is in het Zeeland model gebaseerd op informatie van de topografische kaart 1:10000 en informatie van waterschap Scheldestromen. Figuur 14 geeft een overzicht van het in het Zeeland model opgenomen oppervlaktewater.



Figuur 14: Ligging waterloop typen 1 t/m 6 (Van Baaren et al., 2011, i.v.)

Grondwateraanvulling is een invoerparameter voor het dichtheidsafhankelijk grondwatermodel Zeeland. Het Nationaal Hydrologisch Modelinstrumentarium (NHI) berekent de grondwateraanvulling met behulp van onder andere landgebruik, temperatuur, neerslag en grondwaterstanden. In dit Zeeland model is voor de grondwateraanvulling gebruik gemaakt van de berekeningen van het NHI, versie 1.1.

Voor het zomerhalfjaar (april - september) en voor het winterhalfjaar (oktober-maart) is de gemiddelde waarde genomen van de periode 1990 – 2000.

4.5 Model van Tholen en omgeving

De afgelopen jaren is er voor grondwaterkwantiteitsmodellen toegewerkt naar modellen met celgrootten van $25 \times 25 \text{ m}^2$ om regionale variatie in stijghoogte zo goed mogelijk te vatten. Inmiddels beschikken veel waterschappen in (zoet) Nederland over een dergelijk grondwatermodel (MIPWA (Snepvangers *et al.*, 2007), Ibrahym, Amigo, Moria). Deze modellen worden binnen het deelprogramma Zoetwatervoorziening door de regionale partijen ingezet om de regionale zoetwatervoorzieningsproblematiek te kwantificeren en te zoeken naar regionale oplossingen.

Door de grotere (reken-)complexiteit van modellen waarin ook het transport van zout en de invloed van dichtheidsveranderingen op het stromingspatroon worden meegenomen, zijn modellen op 25m schaal voor (zoute) beheersgebieden van waterschappen / provincies nog niet haalbaar, alhoewel reeds in 2008 voor een lokaal gebied direct rondom Delft een eerste stap is gezet (Roelofsen *et al.*, 2008). Er is daarmee voor deze studie geen model op deze schaal beschikbaar. Tegelijkertijd is het – door de analogie met grote delen van Nederland waar wel met deze schaal wordt gewerkt – erg interessant te weten welke invloed een celgrootte van $25 \times 25 \text{ m}^2$ heeft op modelresultaten.

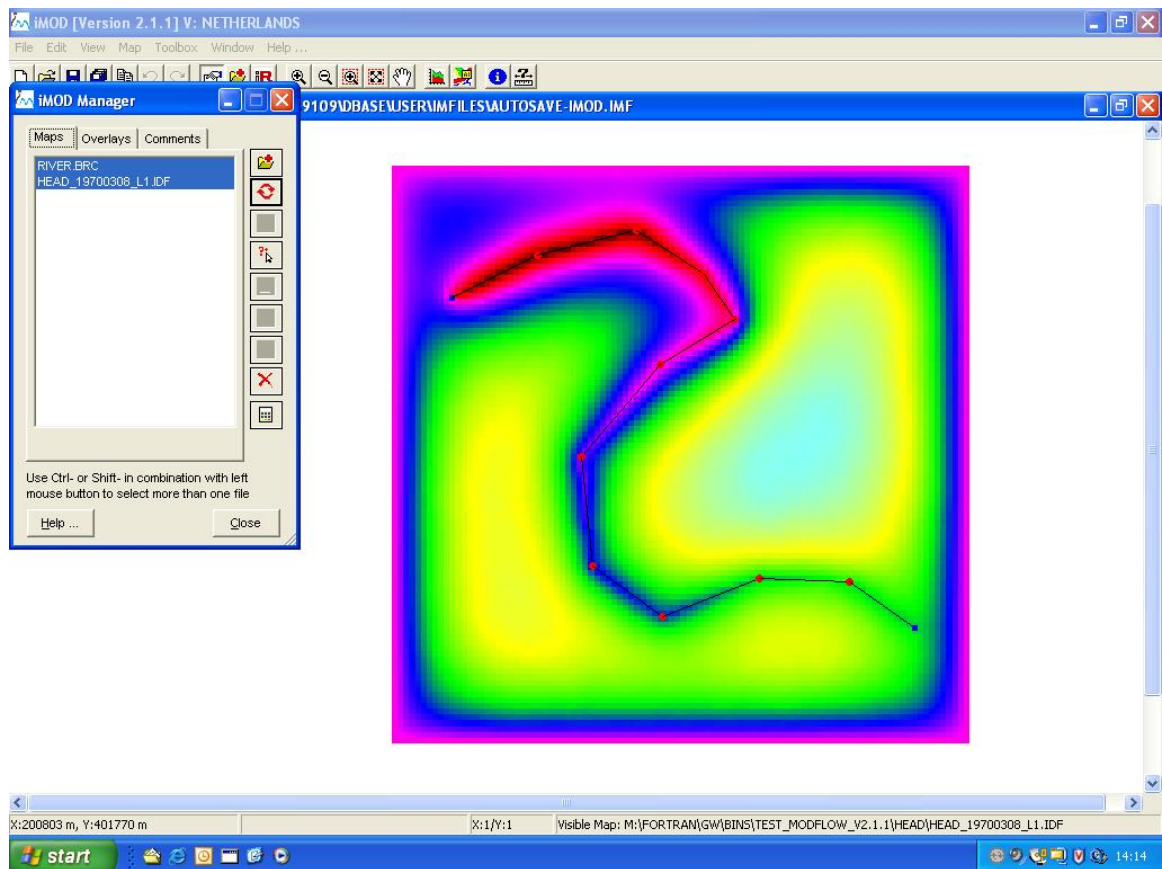
Voor een deelgebied van het Zeeland-model – Tholen en omgeving – is daarom voor deze studie een verfijning gemaakt van het Zeeland model tot 25m (16x verfijnd). Deze verfijning is beperkt tot de x-richting, in de verticaal is de originele laagindeling behouden. Hierbij zijn het maaiveld, de waterlopen, drainagebuizen en onttrekkingen in het interessegebied vanuit de basisgegevens van het Zeeland model toegekend aan de 25m celgrootte, zodat informatie van een fijner niveau dan $250 \times 250 \text{ m}^2$ of $100 \times 100 \text{ m}^2$ is gebruikt in de modellering.

Opschalingsmethode: iMod

iMOD staat voor Interactief Modelleren, en is een gebruiksvriendelijke 'schil' rond gedetailleerde grondwatermodellen. De belangrijkste karakteristieken van iMOD zijn:

- gebruiksvriendelijke schil
- efficiënte visualisatie van rasterbestanden en profielen (2D)
- het doorrekenen van de grondwaterstroming door de verzadigde en onverzadigde zone
- het doorrekenen van (deel)modellen van verschillende grootte en met verschillende knooppuntafstanden
- het inzichtelijk en overdraagbaar doorrekenen van variaties op een basis model (scenario's)

Binnen iMod zijn verschillende technieken geïmplementeerd om efficiënt grondwatermodellen op verschillende schalen en interessegebieden af te leiden vanuit de originele basisgegevens (Figuur 15). Deze technieken zijn toegepast voor het aanmaken van het Tholen model. Belangrijkste techniek is het toekennen van waterlopen als lijnelementen aan verschillende celgrootten.



Figuur 15: Voorbeeld van het toepassen van waterlopen als lijnelementen in iMod

Het Tholen model heeft als eigenschappen:

- 3D, niet-stationair voor zouttransport (maandelijks/seizoenaal)
- Interessegebied Tholen en St. Philipsland
- 3 horizontale celgrootten ($250 \times 250 \text{ m}^2$, $100 \times 100 \text{ m}^2$ en $25 \times 25 \text{ m}^2$), verticaal gelijk aan Zeeland model (40 modellen).
- Gebaseerd op Zeeland model
- Aanmaken nieuw maaiveld en pakketten als drains, waterlopen en onttrekkingen op de drie horizontale schalen, gebaseerd op basisgegevens van het Zeeland model.

5 Resultaten

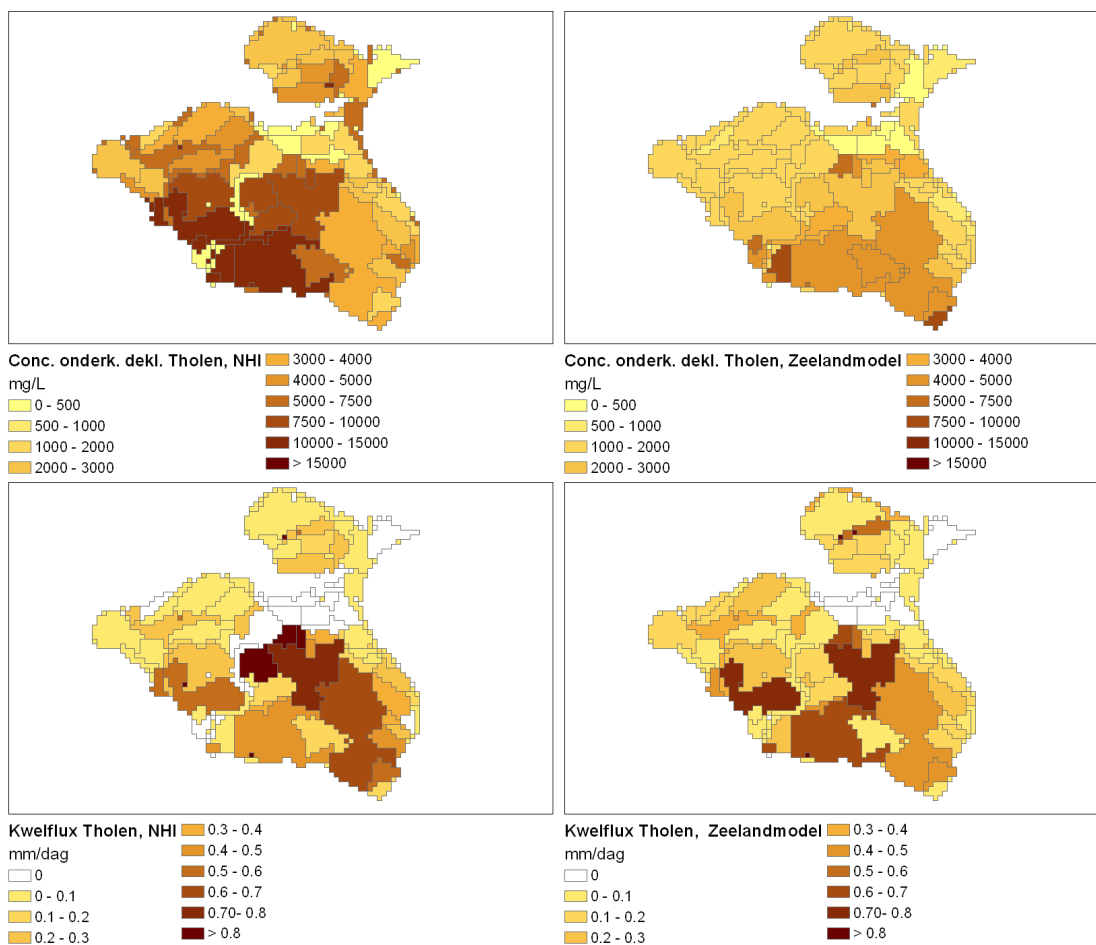
5.1 Vergelijking van de huidige modellen

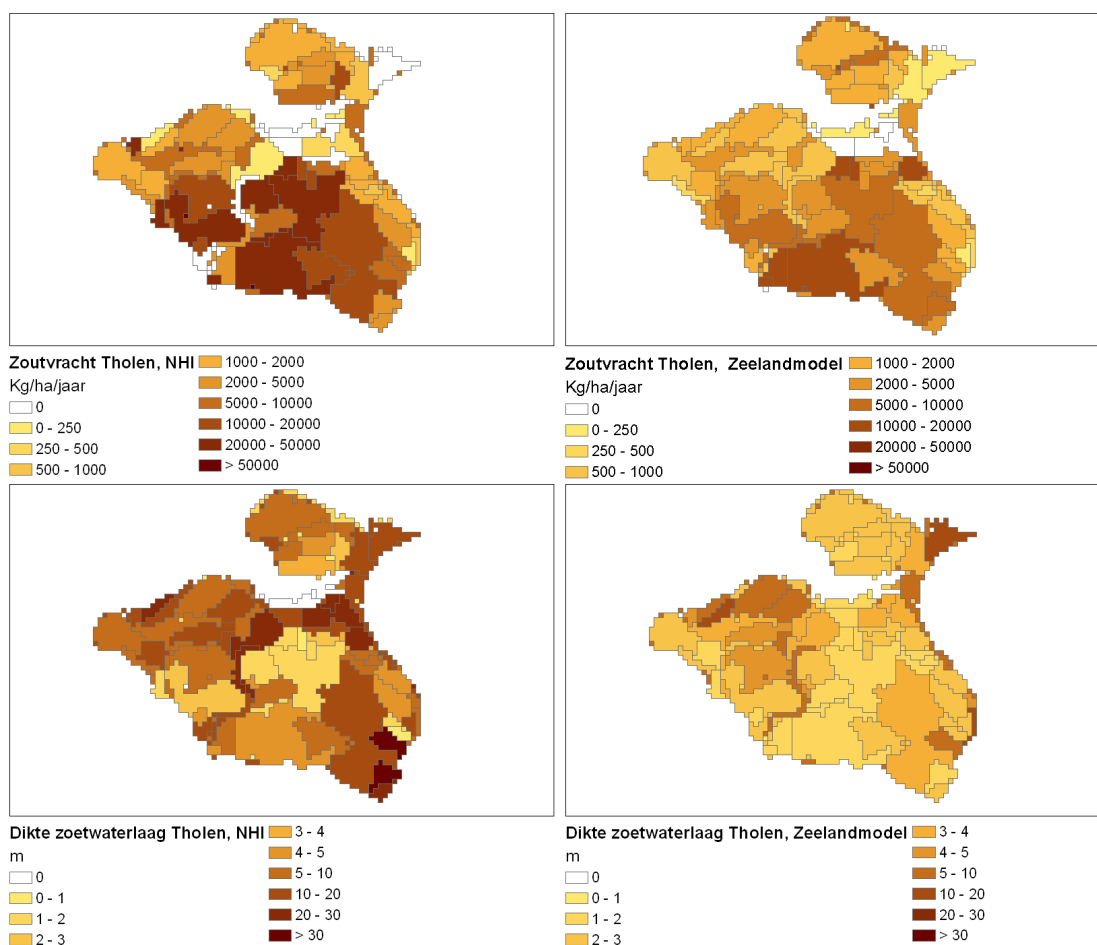
Figuur 16 toont de verschillen in modelresultaten zoals verkregen met het NHI zoet-zout model (250x250m²) en het Zeeland model (100x100m²). De modelresultaten zijn geaggregeerd per poldereenheid. Te zien is dat de modellen voor de kwelfluxen vanaf onderkant deklaag een vergelijkbaar resultaat geven.

Het verschil tussen de (initiële) chlorideconcentratie verdelingen is echter aanzienlijk. In het Zeeland model wordt gerekend met een over het algemeen lagere initiële chlorideconcentraties onder de deklaag dan in het NHI zoet-zout model. De oorzaak hiervan kan wellicht deels gevonden worden in het feit dat voor het Zeeland model gebruik gemaakt is van een andere interpolatietechniek om de puntmetingen van chlorideconcentraties om te werken naar vlakdekkende informatie. In St. Philipsland en het deel van Schouwen-Duiveland dat in de figuren te zien is schuilt de verklaring echter in ieder geval ook in de significant afwijkende afbakening van de deklaag in de twee modellen: in grote delen van deze gebieden is de deklaag in het NHI zoet-zout model beduidend dikker, zodat de chlorideconcentraties onder de deklaag automatisch hoger zijn (waarbij wordt aangenomen dat met de diepte de chlorideconcentratie toeneemt). Tenslotte worden hier nog vier andere redenen genoemd die zullen bijdragen aan verschillen in de resultaten: a. verschil in verticale discretisatie: in het bovenste grondwatersysteem is de modelceldikte Δz van het NHI 2m en van het Zeeland model 0.5 tot 1m; b. verschil in geologie: het NHI zoet-zout model is gebaseerd op REGIS en het Zeeland model op GEOTOP dat het geologische topsysteem veel fijner weergeeft; c. verschil in celgrootte: het 250x250m² model zal een meer gemiddelde (verticale) grondwaterstroming geven zonder (sub)lokale infiltratie/kwel uitschieters met een andere zoet-brak-zout verdeling tot gevolg; en d. verschillen in extra interpolatie van de (initiële) chlorideconcentratie verdeling door het numerieke grondwatermodel. De relatieve bijdragen van deze vier oorzaken bijdragen aan de verschillen is vooralsnog niet nader onderzocht.

De lagere chlorideconcentraties onder de deklaag in het Zeeland model resulteren, in combinatie met de tussen de twee modellen vergelijkbare kwelfluxen, in veel lagere zoutvrachten naar het oppervlaktewater dan in het NHI zoet-zout model. Figuur 16a geeft ook voor beide modellen de ruimtelijke verdeling van de dikte van de “zoetwaterlaag”. Deze zoetwaterlaag is gedefinieerd als de dikte tussen de (gemodelleerde) grondwaterstand en het centrum van de 1^e modellaag waarin een bepaalde chlorideconcentratie wordt overschreden. De hier gehanteerde grenswaarde bedraagt 1500 mg/L.

Hoewel de chlorideconcentraties onder de deklaag in het Zeeland model lager zijn, is de dikte van de zoetwaterlaag (zoals hierboven gedefinieerd) in het Zeeland model over het algemeen geringer. De verklaring hiervoor is simpelweg het gebruik van twee verschillende initiële chlorideconcentratie verdelingen, waarbij de verdeling in het Zeeland model al vrij ondiep de grenswaarde bereikt, maar desondanks onder de deklaag over het algemeen lagere concentraties bevat dan in de NHI-verdeling. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 16b.



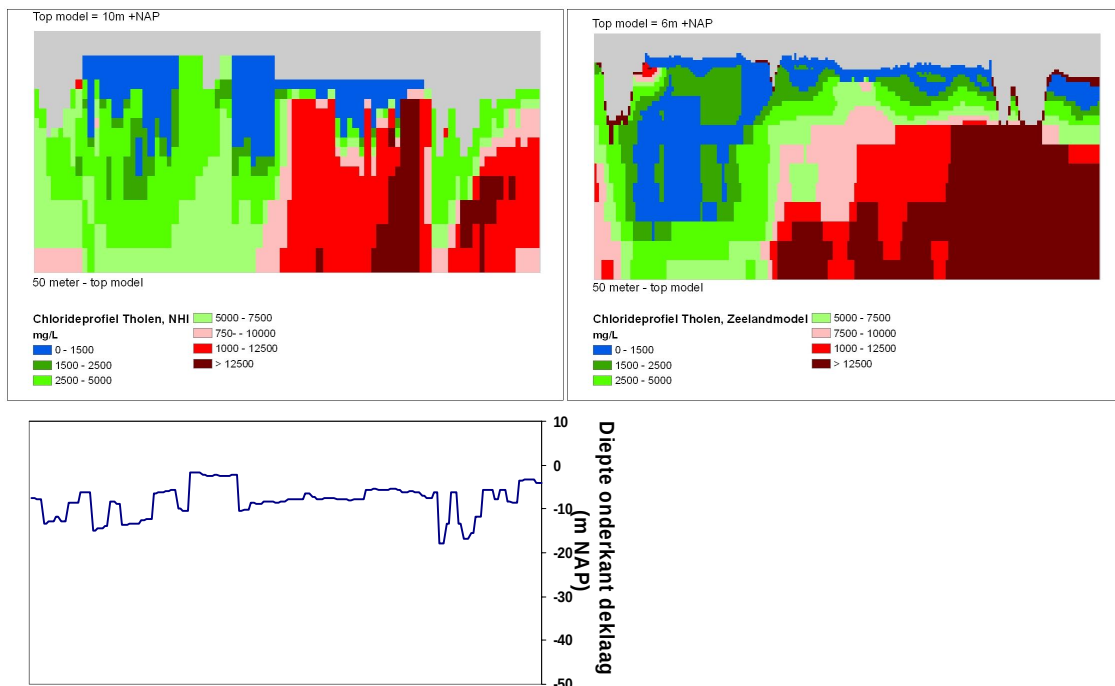


Figuur 16a Vergelijking tussen de resultaten uit het NHI zoet-zout model en het Zeeland model voor het deelgebied Tholen-St. Philipsland en voor het jaar 2010. Getoond worden respectievelijk de kwelflux, de chlorideconcentratie direct onder de deklaag, de zoutvracht naar het oppervlaktewater en de dikte van de zoetwaterlaag.

In Tabel 2 worden de resultaten voor Tholen/St. Philipsland, zoals verkregen met het NHI zoet-zout model en met het Zeeland model, vergeleken met de getallen uit de Metastudie (De Vries *et al.*, 2009). Hierbij gaat het om over het gehele deelgebied geaggregeerde getallen. Merk op dat deze geaggregeerde kwelfluxen en chlorideconcentraties niet met elkaar vermenigvuldigd mogen worden om een (gemiddelde) zoutvracht te verkrijgen, omdat men in dat geval uit moet gaan van fluxgewogen concentraties. Zoals in Figuur 16a is te zien variëren zowel kwelflux als chlorideconcentratie ruimtelijk sterk, waardoor vermenigvuldiging van de getallen uit Tabel 2 tot grote fouten kan leiden.

Tabel 2: Vergelijking tussen de verschillende inschattingen van kwel en chlorideconcentratie voor Tholen/St. Philipsland

	Kwel (mm/zomerhalfjaar)	Chlorideconcentratie (mg/L)
Metastudie (De Vries <i>et al.</i> , 2009)	34	5000
NHI zoet-zout model	52	6513
Zeeland model	51	2807



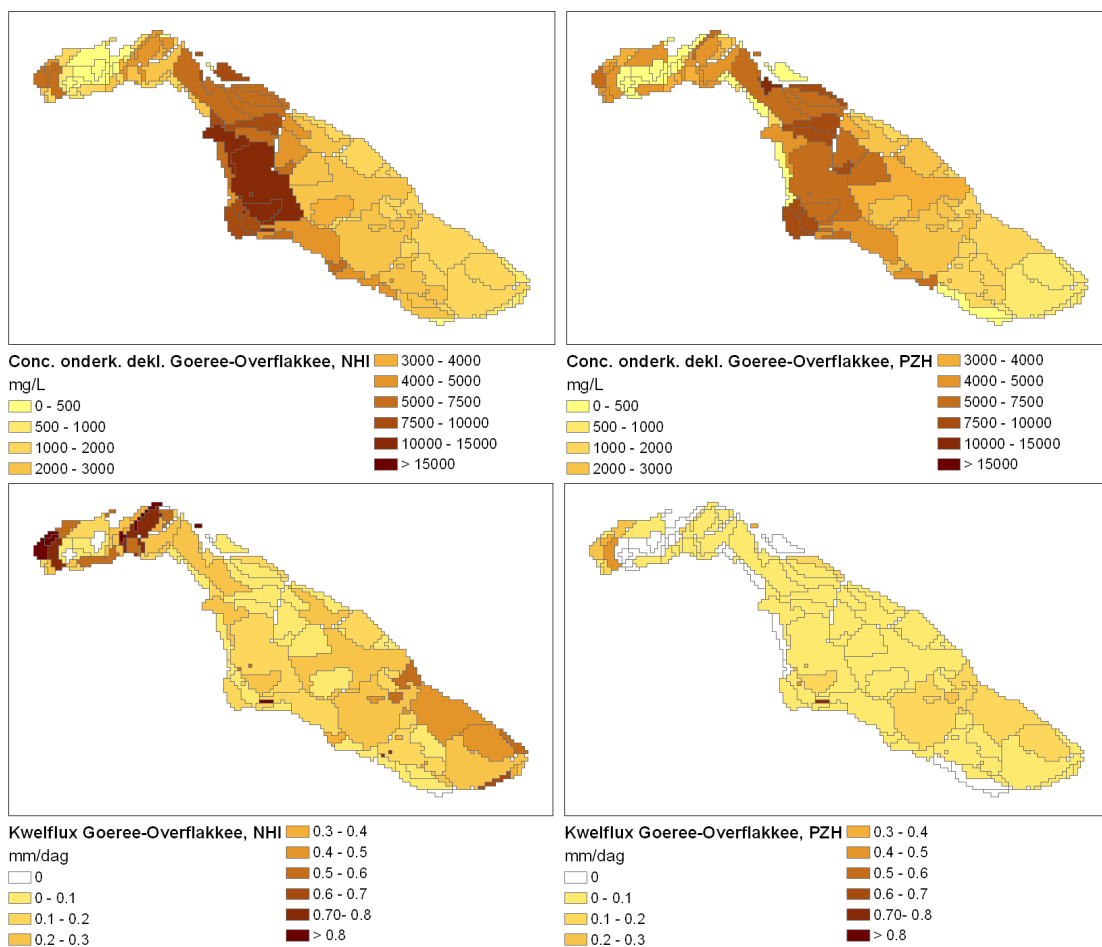
Figuur 16b Boven: Vergelijking tussen de Chlorideprofielen van het NHI en het Zeelandmodel in Tholen. Het profiel is in Noord-Zuid richting genomen, door het centrum van de het gebied zoals getoond in Figuur 16a. Onder: diepte van de onderkant van de deklaag langs het profiel (gelijk in beide modellen).

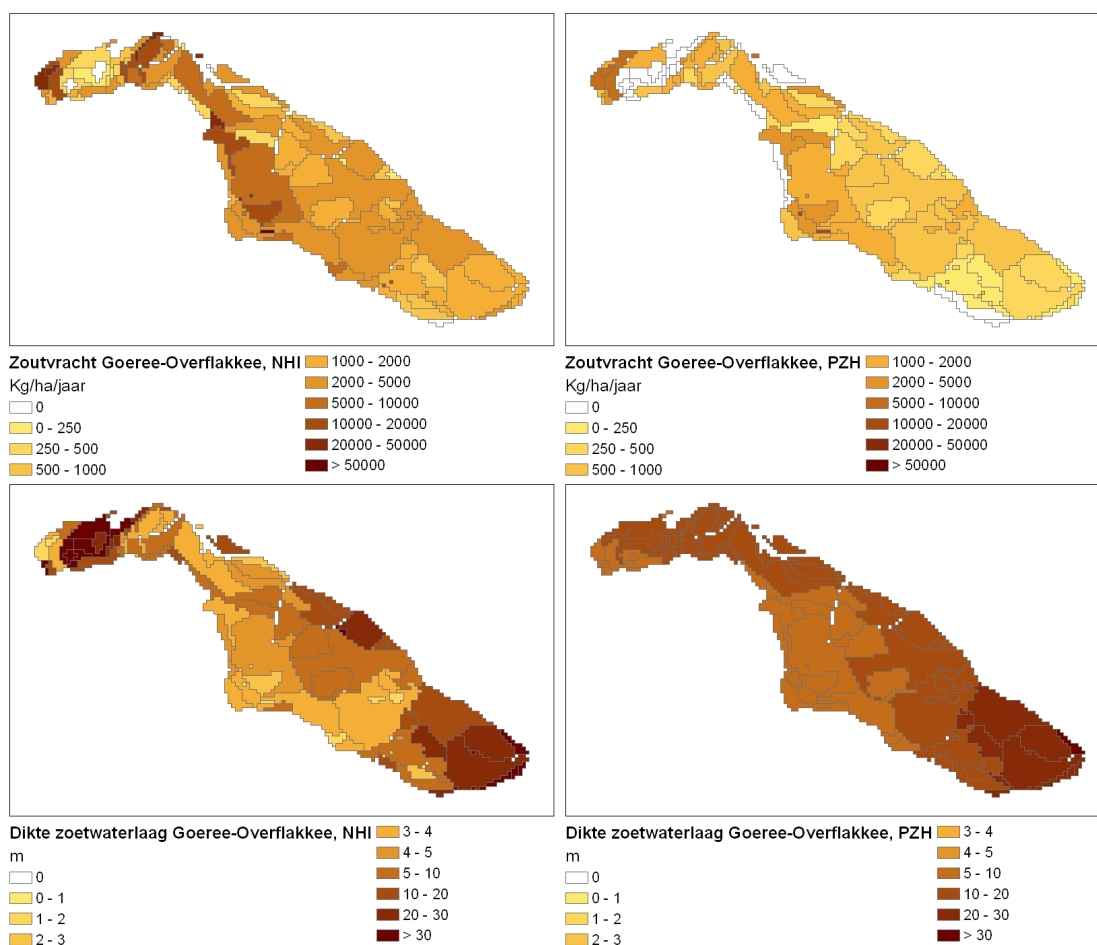
Opvallend is de goede overeenkomst tussen de door het Zeelandmodel en het NHI berekende kwel, dit terwijl er toch grote verschillen zijn in modelopbouw.

Op het eerste gezicht lijken het NHI en het Zeelandmodel meer kwel te berekenen dan in de Metastudie genoemd wordt. Er moet echter bedacht worden dat de berekeningen met het NHI en het Zeelandmodel jaargemiddelde berekeningen zijn, terwijl de Metastudie getallen geeft die gelden voor het zomerhalfjaar. In het zomerhalfjaar wordt de kwelflux gereduceerd door peilopzet en verdamping van kwelwater (De Vries, 2009). In de Metastudie wordt aangenomen dat in de zomerperiode 1/3 van het jaarvolume aan toestromend kwelwater de polderwateren bereikt in een continue stroom (De Vries, 2009). Met deze aanname zijn de jaargemiddelde modeluitkomsten in overeenkomst met de getallen in de Metastudie.

Het Zeeland model berekent voor Tholen/St. Philipsland een met het NHI vergelijkbare kwelflux. De chlorideconcentraties zijn echter beduidend lager. De redenen hierachter zijn hierboven reeds gegeven, bij de discussie van Figuur 16a. Het is duidelijk dat het verschil in de zoutvrachten die door NHI en het Zeeland model voor dit gebied berekend worden weinig te maken hebben met het verschil in modelresolutie, maar alles met de tussen de twee modellen verschillende initiële zoet-brak-zout verdeling.

Op eenzelfde manier als voor Tholen/St. Philipsland worden in Figuur 17 de resultaten vergeleken voor het deelgebied Goeree-Overflakkee tussen het PZH model en het NHI. Beide modellen hebben een $250 \times 250 \text{ m}^2$ discretisatie en verschillen tussen de resultaten van beide modellen kunnen dus in ieder geval niet aan de modelresolutie toegeschreven worden. De zeer sterke afwijking in de door het NHI berekende kwel ten opzichte van de Metastudie en het PZH-model doet vermoeden dat de gebruikte versie van het NHI de kwel om onbekende reden overschat. Rekening houdend met het verschil in kwelflux tussen het zomerhalfjaar en jaargemiddeld zijn de Metastudie en het PZH-model wel met elkaar in overeenstemming.



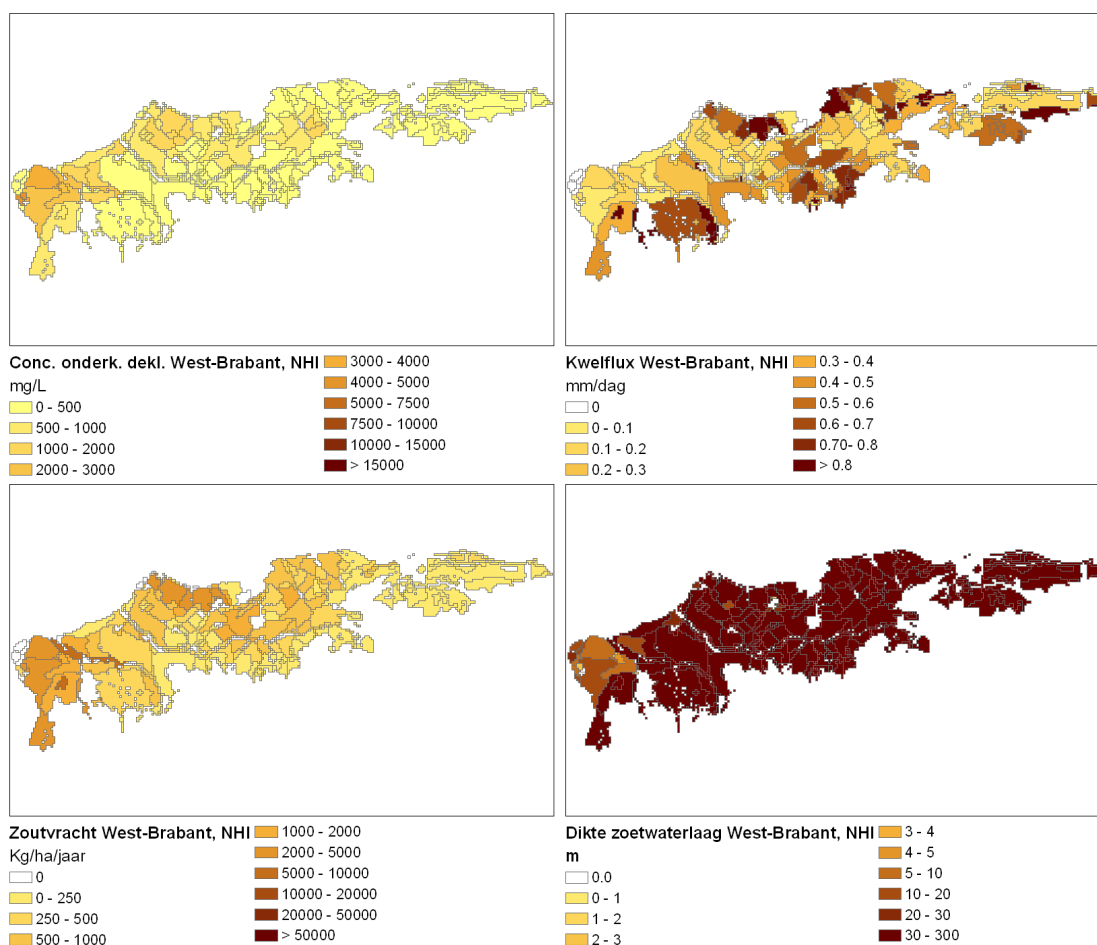


Figuur 17: Vergelijking tussen de resultaten uit het NHI zoet-zout model en het Zuid-Holland model voor het deelgebied Goeree-Overflakkee en voor het jaar 2010. Getoond worden respectievelijk de chlorideconcentratie direct onder de deklaag, de kwelflux, de zoutvracht naar het oppervlaktewater en de dikte van de zoetwaterlaag.

Tabel 3: Vergelijking tussen de verschillende inschattingen van kwel en chlorideconcentratie voor Goeree-Overflakkee.

	Kwel (mm/zomerhalfjaar)	Chlorideconcentratie (mg/L)
Metastudie (De Vries et al., 2009)	8	5200
NHI zoet-zout model	41	3741
PZH model	13	3379

Tot slot geven Figuur 18 en Tabel 4 de resultaten weer van de berekening met het NHI zoet-zout model in deelgebied West-Brabant. Omdat dit gebied door geen van de overige zoet-zoutmodellen gedekt wordt is hier geen directe vergelijking mogelijk. Tabel 4 geeft wel weer een vergelijking tussen de NHI-getallen en die uit de Metastudie. De getallen zijn voor de chlorideconcentratie gelijk, voor de kwelflux naar het oppervlaktewater geldt weer dat het getoonde verschil verklaard kan worden vanuit het feit dat de door de Metastudie gegeven getallen voor de kwel gelden voor het zomerhalfjaar, en de door het NHI berekende getal een jaargemiddelde kwelflux is.



Figuur 18: Presentatie van de resultaten uit het NHI zoet-zout model voor het deelgebied West-Brabant voor het jaar 2010. Getoond worden respectievelijk de chlorideconcentratie direct onder de deklaag, de kwelflux, de zoutvracht naar het oppervlaktewater en de dikte van de zoetwaterlaag.

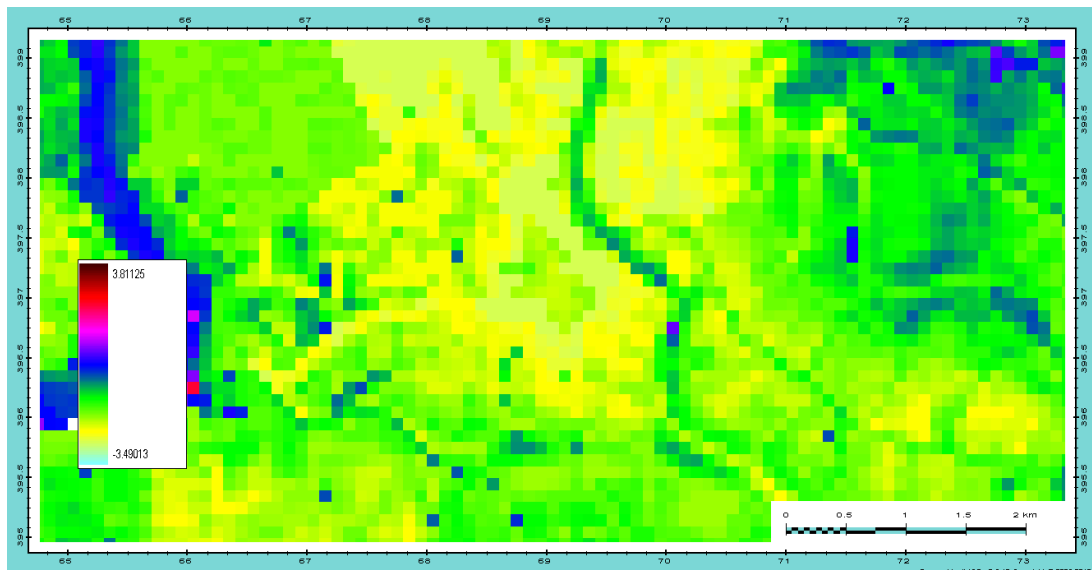
Tabel 4: Vergelijking tussen de verschillende inschattingen van kwel en chlorideconcentratie voor het kleigebied van West-Brabant.

	Kwel (mm/zomerhalfjaar)	Chlorideconcentratie (mg/L)
Metastudie (De Vries <i>et al.</i> , 2009)	38	500
NHI zoet-zout model	68	499

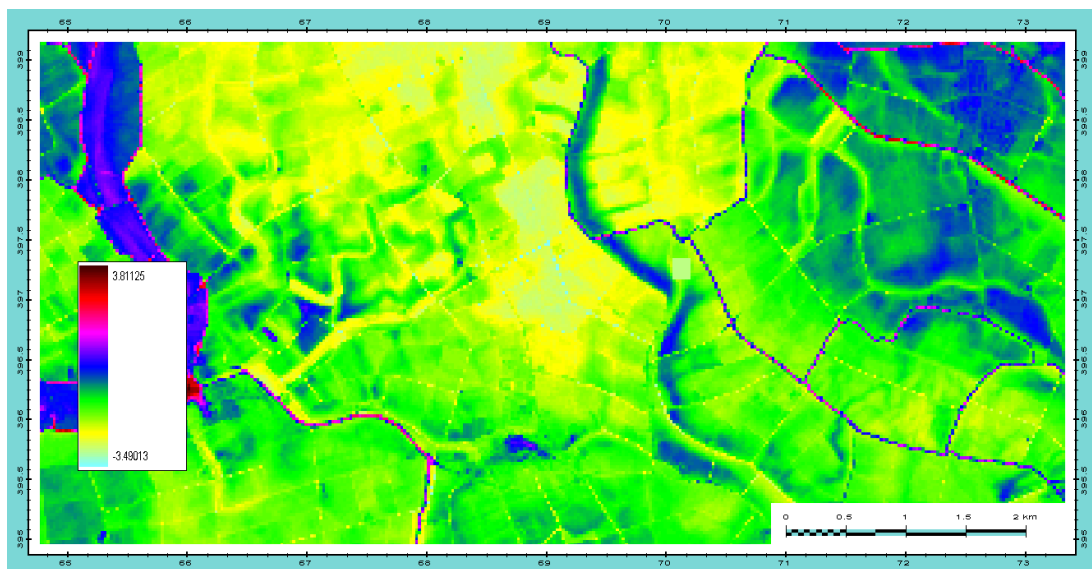
5.2 Verfijning van het Zeeland model in Tholen – St. Philipsland

5.2.1 Aanmaken verfijnde ontwatering

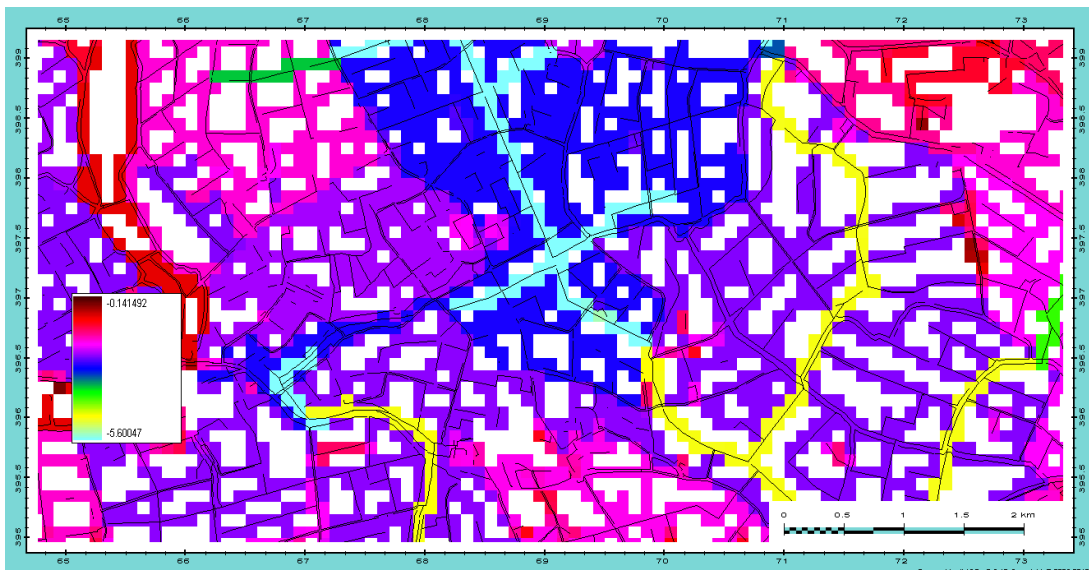
Met behulp van iMod zijn de ontwateringsmiddelen op de verfijnde schaal (25x25m²) afgeleid. Voor de buisdrainage is de diepteligging opnieuw bepaald aan de hand van een verfijnd maaiveld (Figuur 20). In vergelijking tot de oorspronkelijke schaal (100x100m², Figuur 19) komt het aanwezige reliëf veel duidelijker tot uiting in de verfijnde kaart. De waterlopen zijn aan de hand van de ligging van de waterlopen op de topografische kaart 1:10000 toegekend aan de 25x25m² modelcellen (Figuur 22). Daarbij is de peilinformatie uit de basisdata van het Zeeland model gebruikt. In vergelijking tot de waterlopen in het 100x100m² model (Figuur 21), worden de waterlopen veel scherper gevolgd, en zijn er in het fijne model ook veel modelcellen zonder oppervlaktewater. Dit laatste komt in het oorspronkelijke model slechts beperkt voor.



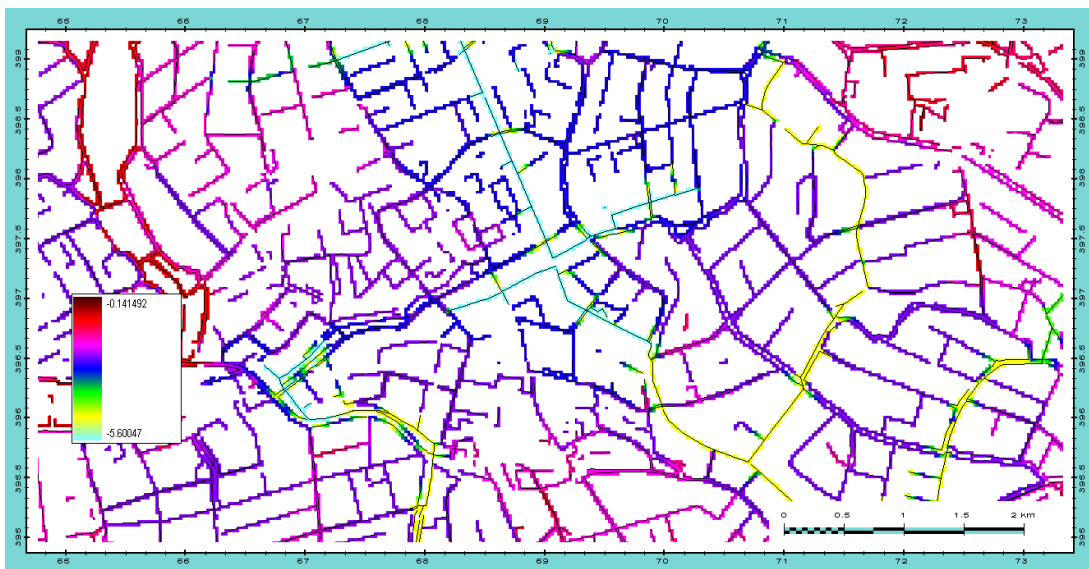
Figuur 19: Oorspronkelijke buisdrainage (100x100m²).



Figuur 20: Buisdrainage 25x25m² op basis van AHN25 (=mediaanopschaling van 5x5m²) minus 80 cm.



Figuur 21: Waterlopen 100x100m² model, zwarte lijnen is het TOP10 vector bestand met de ligging van de waterlopen.

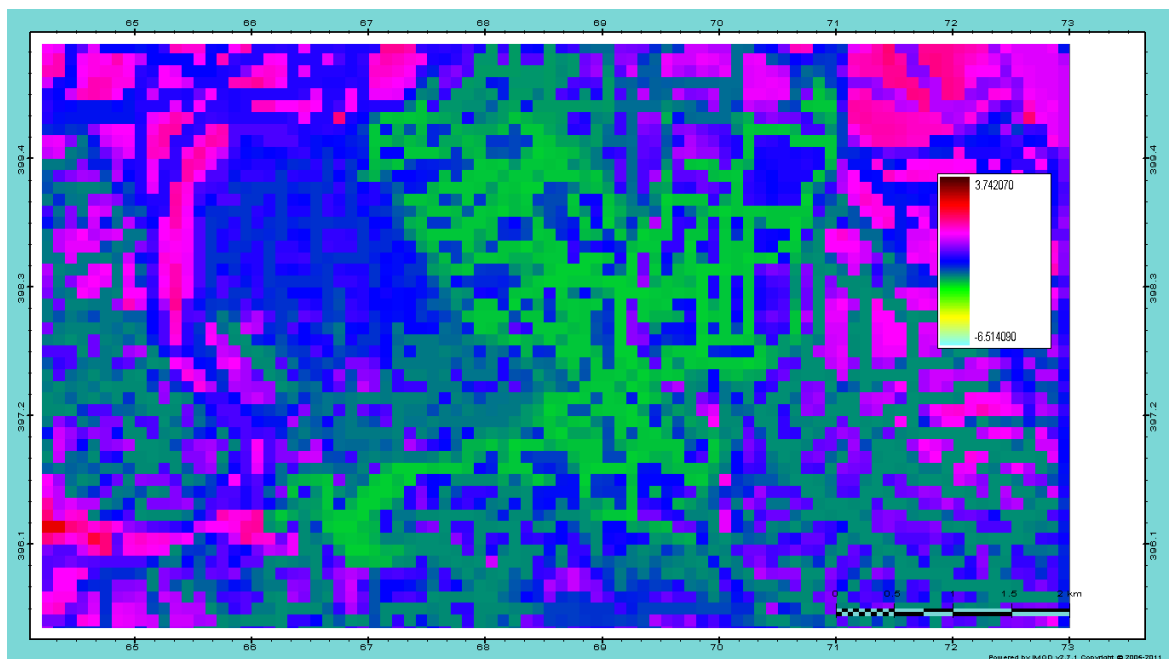


Figuur 22: Waterlopen 25x25m² op basis van TOP10 vector bestand met de ligging van de waterlopen.

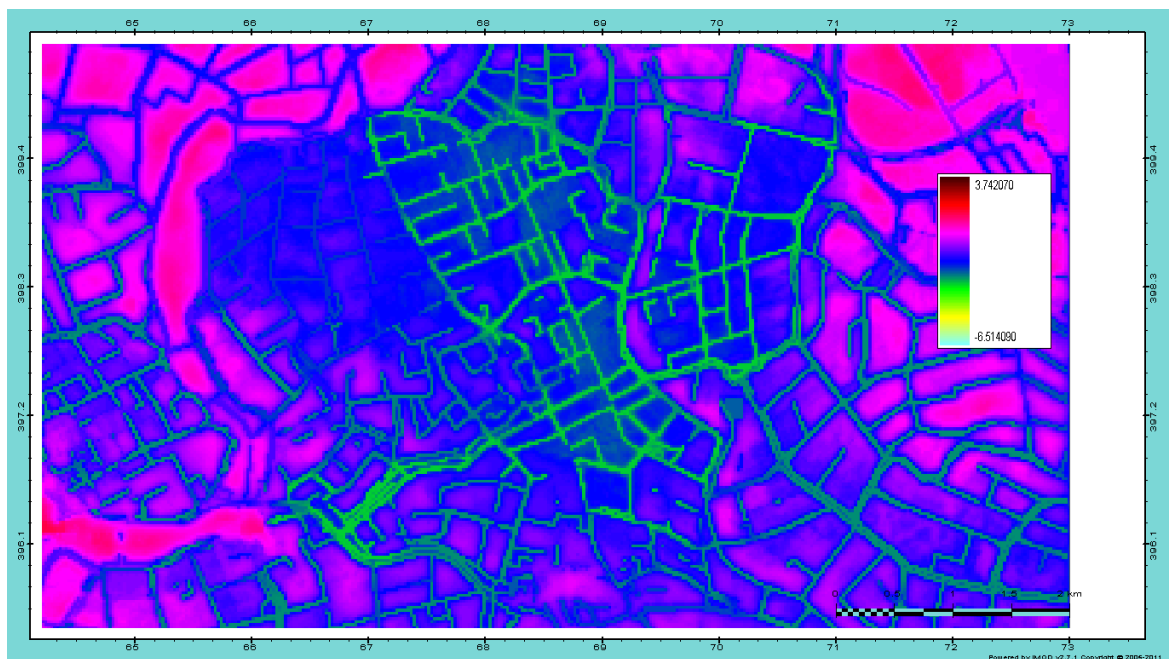
5.2.2 Resultaten

Figuur 23 geeft de berekende grondwaterstand in het oorspronkelijke 100x100m² model, terwijl Figuur 24 de berekende grondwaterstand in het 25x25m² model laat zien. Figuur 25 geeft beide grondwaterstanden over een west-oost profiel over Tholen. Uit deze simulaties blijkt dat de opbollingen tussen de sloten met een 25x25m² realistischer berekend worden dan met een 100x100m² model. Ook is het effect van de diepe ontwatering (5m-NAP) van de hoofdvaarten beter in beeld gebracht.

Uit de tijdreeksen voor een willekeurig punt in Tholen (Figuur 26) is daarnaast ook goed te zien dat de temporele fluctuatie van het 25x25m² model groter is dan in het 100x100m² model.



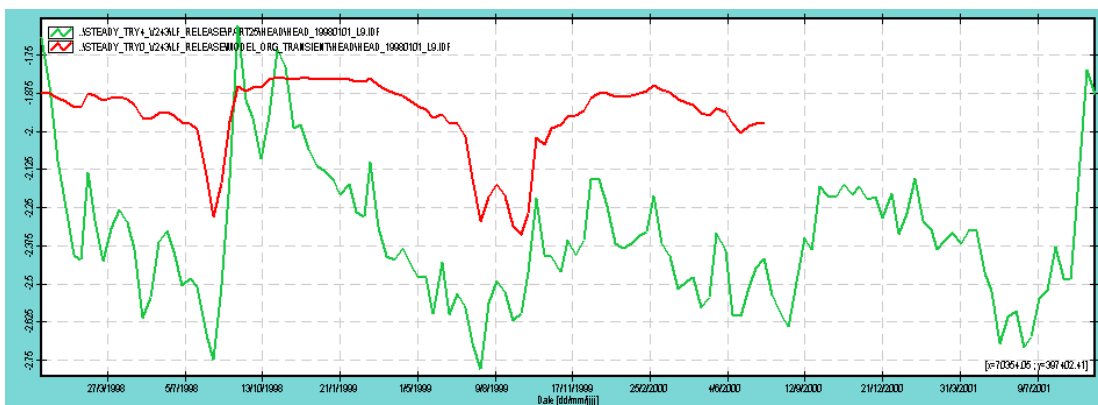
Figuur 23: Grondwaterstand 100x100m² model.



Figuur 24: Grondwaterstand 25x25m² model.



Figuur 25: Grondwaterstand in een west-oost profiel in 100x100m² model (blauw, vlakker) en 25x25m² model (rood).



Figuur 26: Tijdreeks willekeurig punt, rood 100x100m² model, groen 25x25m² model.

Figuur 27, Figuur 28 en Figuur 29 geven respectievelijk de initiële chlorideconcentratie verdelingen, kwelfluxen en zoutvrachten weer zoals die voor $t=0$ (2010) berekend zijn met de verschillende Tholenmodellen. In Tabel 5 worden een aantal geaggregeerde eigenschappen van deze rasters gegeven (totale kwelfluxen, gemiddelde chlorideconcentraties in de kwelgebieden en totale zoutvrachten).

Het eerste wat opvalt aan (vooral) de getallen in Tabel 5 is de toenemende totale kwelflux bij grotere modelcellen. De modelschematisatie is gebaseerd op een rastergrootte van 25 x 25 meter waarbij de conductance hoofdzakelijk gebaseerd is op de lengte keer het natte oppervlak gedeeld door de intreeweerstand van het ontwateringsmiddel. Vanuit hier is de conductance eenvoudigweg opgeschaald (som van alle aanwezige conductances) naar een grover raster (100 x 100 m). Deze werkwijze is een praktische benadering aangezien in een enkele grove modelcel immers meerdere processen een rol spelen, waardoor de relatie tussen de gemiddelde grondwaterstand voor een grove modelcel ook meerdere weerstanden beschrijft waardoor de conductance verminderd dient te worden. Dit wordt in de opschaling binnen iMOD niet meegenomen. De opschaling van grondwatermodellen resulteert op deze manier dus in een overschatting van kwel en afvoeren. Daarmee is tegelijk gezegd dat de door het 25x25m² model berekende kwel dicht bij de werkelijkheid zal liggen, als tenminste

aangenomen wordt dat alle andere modelconcepten en de parametrisaties daarvan wel correct zijn.

Een werkwijze om de opschaling van een grondwatermodel correct uit te voeren, is om de drainageniveaus te corrigeren zodat de relatie tussen de gemiddelde grondwaterstand voor een grove modelcel resulteert in een gelijke ontwatering als deze van alle ontwateringen binnen de fijne modelcellen tezamen. Dit is echter een tijdrovend proces, we hebben hiervoor immers alle grondwaterstanden uit het fijne model nodig. Bovenal resulteert dit in een opgeschaald model, dat slechts toepasbaar is voor de huidige situatie waarmee het opgeschaald is. Voor scenario berekeningen zouden de gecorrigeerde drainageniveaus niet meer valide zijn aangezien de grondwaterstand verandert.

Het gedachtegoed van iMOD is overigens dat het opgeschaald rekenen onderdeel is van een *trappen-raket* waarbij het opgeschaalde model uiteindelijk geldt als randvoorwaarden voor het originele model (uitgangsschaal) waarvoor de conductance geparameteriseerd zijn.

Een interessante observatie is vervolgens dat, gaande van het 250x250m² model naar het 25x25m² model, de zoutvracht procentueel veel minder sterk (-11% voor 2010) afneemt dan de kwelflux (-30% voor 2010). Om dit te kunnen begrijpen moet bedacht worden dat de initiële chlorideconcentratie verdeling zelf een product is van een modellering met het Zeeland model waar het deelmodel voor Tholen uit onttrokken is. Het Zeeland model is daarbij gebruikt als interpolator voor de metingen. Door de puntmetingen in het model te stoppen en hier vervolgens enkele tientallen jaren mee te rekenen ontstaat een realistische chlorideconcentratie verdeling met plausibele contouren.

Vanwege het gebruik van het Zeeland model als interpolator vertoont de initiële chlorideconcentratie verdeling gelijkenissen met de kwelkaart; immers, waar kwel optreedt, kan het zout hoger gekomen zijn dat op plaatsen waar geen kwel maar infiltratie van zoeter oppervlaktewater optreedt. Zodoende is er een correlatie tussen de locaties met (sterke) kwel en locaties met hoge chlorideconcentraties onder de deklaag.

Een mogelijke verklaring voor het feit dat bij hogere modelresolutie de reductie in zoutvracht achterblijft bij de reductie in kwel, is dat bovengenoemde correlatie sterker wordt. Het Zeeland model heeft zelf een 100x100m² resolutie en het ligt dus voor de hand dat op deze resolutie de correlatie hoger is dan op een lagere resolutie. Bij een lagere resolutie vinden er meer uitmiddelingen plaats waardoor de correlatie verzwakt. Het is niet verwonderlijk dat een nog hogere modelresolutie (25x25m²) minder effect heeft op deze correlatie, doordat de initiële chlorideconcentratie nu eenmaal op een 100x100m² resolutie is berekend en een neerschaling van dit bestand naar 25x25m² dezelfde verdeling oplevert.

Aldus kan verklaard worden dat de gemiddelde concentratie van het kwelwater (Tabel 5) in het 100x100m² model significant hoger is dan in het 250x250m² model, waardoor de zoutvracht op peil blijft terwijl de kwelflux toch aanzienlijk lager is. De gemiddelde concentratie van het kwelwater in het 25x25m² model neemt om hierboven genoemde reden niet veel verder toe, en de resulterende zoutvracht neemt dan ook met de kwel significant af ten opzichte van het 100x100m² model.

Tabel 5 laat ook zien dat als de zoutvrachten genormaliseerd worden met de kwelflux², en het effect van de opschalingsfout op de kwelflux dus uitgeschakeld wordt, hogere modelresoluties een hogere zoutvracht tot gevolg hebben. Dit wordt hier volledig toegeschreven aan de sterkere correlatie tussen kwelkaart en zoutverdeling bij hogere modelresoluties.

2. De normalisering van de zoutvracht is uitgevoerd door de zoutvracht te delen door de kwelflux.

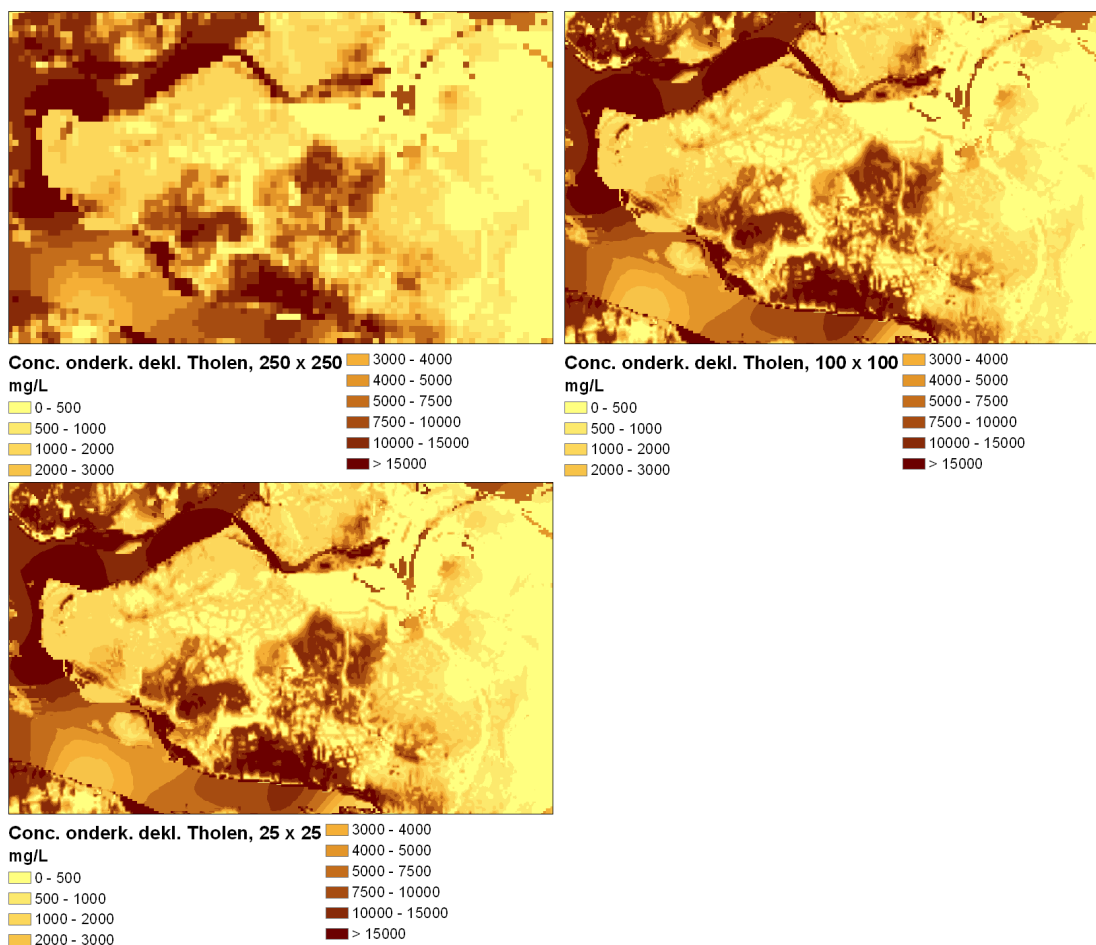
Tabel 6 geeft de modelresultaten voor 2020, als het model dus 10 jaar doorgerekend heeft (de modellen zijn voor deze studie niet langer doorgerekend omdat de $25 \times 25 \text{ m}^2$ case rekenintensief is). Welbeschouwd is het enige verschil tussen de modellering van 2010 en die van 2020 een veranderde chlorideconcentratie verdeling, onder invloed van 10 jaar grondwaterstroming. Omdat de 'stress' op het model (m.u.v. een iets andere dichtheidsverdeling als gevolg van de veranderde chlorideconcentratie verdeling) hetzelfde is in 2020 als in 2010, blijft de kwelflux zoals verwacht nagenoeg gelijk aan de situatie in 2010.

De gemiddelde concentratie van het kwelwater verandert in de loop van de gemodelleerde 10 jaar niet veel (zie Tabel 6). Desondanks neemt de zoutvracht in alle drie de modelresoluties wel toe. Omdat kwel ('totaal over modelgebied') en gemiddelde chlorideconcentratie nagenoeg gelijk blijven, moet de toename in zoutvracht toegeschreven worden aan een hogere fluxgemiddelde chlorideconcentratie, welke het resultaat is als vooral de gebieden met hogere kwel hogere zoutconcentraties onder de deklaag krijgen, terwijl dit in termen van de gemiddelde (niet fluxgewogen) chlorideconcentratie gecompenseerd wordt door verzoeting in gebieden met lagere kwelintensiteiten.

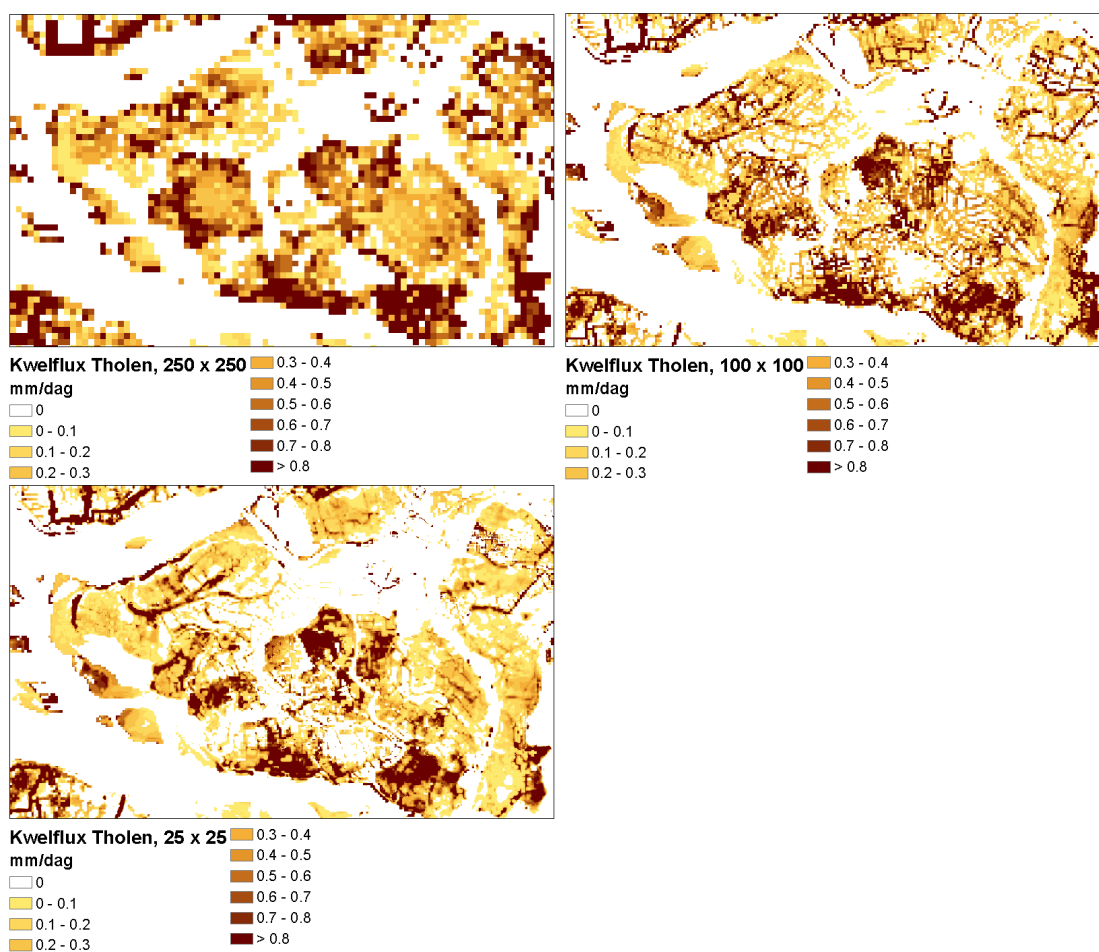
Wanneer genormaliseerd met de kwelfluxen, neemt de toename van de zoutvracht toe met de modelresolutie. Dit kan mogelijk verklaard worden met het in Hoofdstuk 3 beschreven mechanisme: bij een hogere modelresolutie wordt dieper en daarmee zouter grondwater aangetrokken via een betere modellering van de "opkegeling". Het effect lijkt echter vrij beperkt en bovendien al grotendeels uitgewerkt bij de verfijning van $100 \times 100 \text{ m}^2$ naar $25 \times 25 \text{ m}^2$. Het kleine effect maakt echter ook dat niet uitgesloten kan worden dat de grotere toename van de zoutvracht bij hogere modelresolutie op toeval berust.

Het verdient echter aanbeveling verder uit te zoeken of de zoutvracht significant anders is wanneer de (in het veld gemeten) opkegeling onder sloten zich kan ontwikkelen door het numerieke grondwatersysteem langer dan 10 jaar en met een verfijndere resolutie dan $25 \times 25 \text{ m}^2$ door te rekenen.

De met de verschillende Tholen-modellen berekende zoetwatervoorraden (resultaten hier niet getoond) laten geen belangrijke onderlinge verschillen zien. Ook van een duidelijke ontwikkeling is in de 10 doorgerekende jaren (nog) geen sprake.



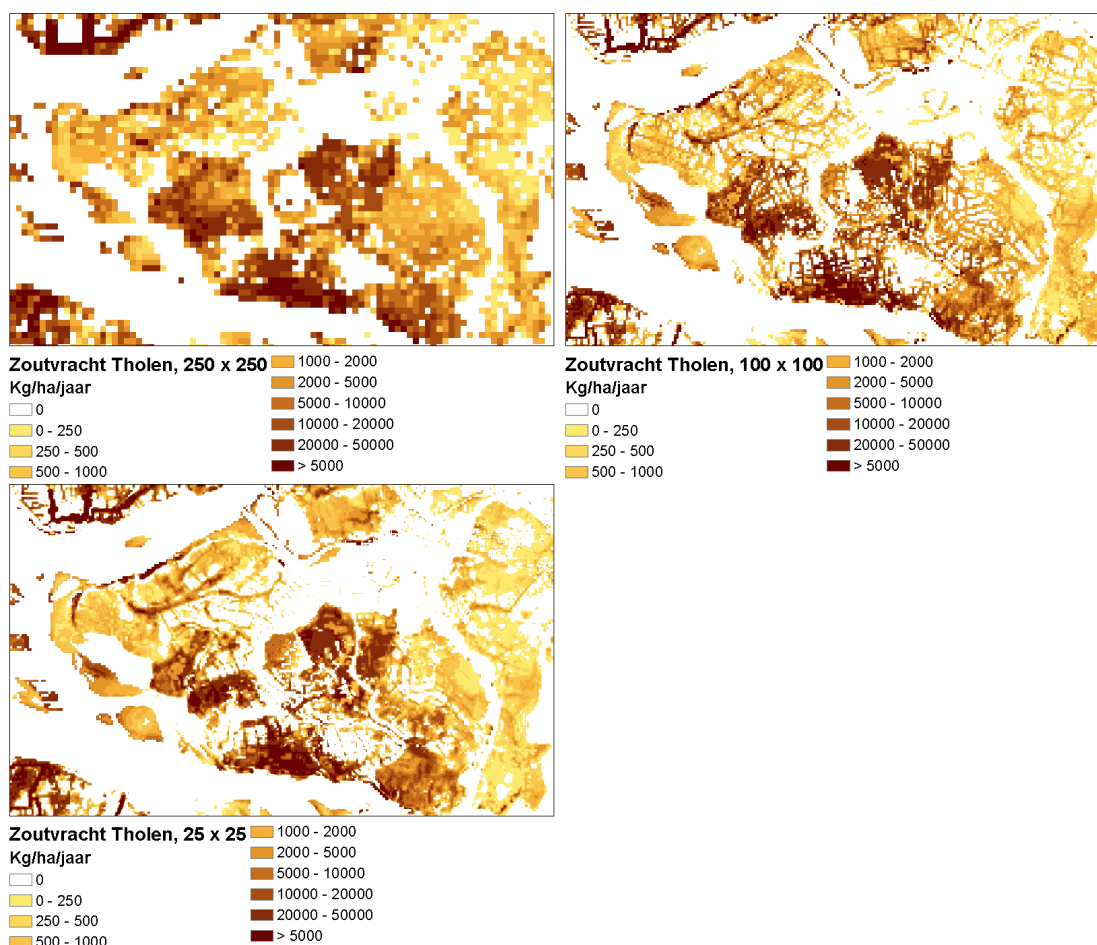
Figuur 27: De initiële chlorideconcentratie verdeling onder de deklaag op de verschillende modelresoluties (resp. $250 \times 250 \text{ m}^2$, $100 \times 100 \text{ m}^2$ en $25 \times 25 \text{ m}^2$).



Figuur 28: Berekende kwelfluxen (2010) met respectievelijk het 250x250m², 100x100m² en 25x25m² Tholen model.

Tabel 5: Vergelijking tussen de kwel, chlorideconcentratie, zoutvracht en zoetwatervoorraad, zoals berekend voor 2010 met de verschillende Tholenmodellen. De getallen in rood geven de met de kwelflux genormaliseerde resultaten weer.

	Kwel (*10 ⁵ m ³ /dag, totaal over modelgebied)	Chlorideconcentratie (mg/L, gemiddeld over modelgebied met kwel)	Zoutvracht (*10 ⁵ Kg/dag, totaal over modelgebied)
Tholenmodel 250x250m ²	1.87	3768	8.55 (4.75)
Tholenmodel 100x100m ²	1.57	4123	8.35 (5.32)
Tholenmodel 25x25m ²	1.32	4192	7.60 (5.76)



Figuur 29: Berekende zoutvrachten (2010) met respectievelijk het 250x250m², 100x100m² en 25x25m² Tholen model.

Tabel 6: Vergelijking tussen de kwel, chlorideconcentratie, zoutvracht en zoetwatervoorraad, zoals berekend voor 2020 met de verschillende Tholen modellen. De getallen in rood geven de met de kwelflux genormaliseerde resultaten weer. De getallen in blauw geven het verschil weer met de resultaten van 2010. Voor de zoutvracht gelden deze verschillen voor de genormaliseerde getallen.

	Kwel (*10 ⁵ m ³ /dag, totaal over modelgebied)	Chlorideconcentratie (mg/L, gemiddeld over modelgebied met kwel)	Zoutvracht (*10 ⁵ Kg/dag, totaal over modelgebied)
Tholen model 250x250m ²	1.85 (-0.02)	3848 (+80)	9.49 (5.13) (+0.38)
Tholen model 100x100m ²	1.56 (-0.01)	4103 (-20)	10.2 (6.53) (+1.21)
Tholen model 25x25m ²	1.30 (-0.02)	4151 (-41)	9.21 (7.08) (+1.32)

6 Synthese

6.1 Discussie en conclusies

Detailprocessen rondom een waterloop kunnen een belangrijke invloed hebben op de berekening van zoutvracht naar het oppervlaktewater, zoals aangetoond in de numerieke experimenten in hoofdstuk 3. Het verwachtte effect dat een preciezere berekening van de stroombanen leidt tot een betere simulatie van opkegeling onder waterlopen, en daarmee tot een toename van de zoutvracht is in simulaties aangetoond. Schaalgrootte lijkt daarmee een belangrijke factor in de berekening van de zoutvracht. Meer experimenten zijn nodig om aan te kunnen geven in welke situaties dit effect belangrijk is, en om dit effect te duiden in het licht van de overige onzekerheden in regionale modellen. Daarnaast zijn niet alle detailprocessen rondom een waterloop in de simulaties verwerkt. Preferente stroombanen kunnen grote invloed hebben op de zoutvracht, hier is in de simulaties geen rekening mee gehouden (De Louw et al., 2010). Uit de analyse van de zoetwatervoorraad onder een perceel lijkt deze in ieder geval tot een schaalgrootte van $25 \times 25 \text{ m}^2$ redelijk te benaderen. Ook hiervoor geldt dat deze analyse nog niet generiek vertaald kan worden, aangezien slechts één specifiek systeem is beschouwd.

Uit de vergelijking van de verschillende dichtheidsafhankelijke grondwatermodellen in de gebieden Tholen en Goeree-Overflakkee blijken duidelijke verschillen op te treden tussen de door deze modellen berekende zoutvrachten. Dit is ook het geval voor de berekende zoetwatervoorraad. Uit de vergelijking tussen de kwelflux tussen het Zeeland model en het NHI zoet-zout model blijkt deze vergelijkbaar. Toch is de zoutvracht in het NHI-zoetzout groter dan de door het Zeeland-model berekende zoutvracht. De chlorideconcentratie van het grondwater onder de deklaag lijkt hierin de bepalende factor: deze is in het Zeeland model ruwweg de helft lager dan in het NHI zoet-zout model. Het is niet bekend welke chlorideconcentratie beter de werkelijkheid weergeeft; vergelijking met verschillende typen metingen³ is nodig om hierover uitsluitsel te geven. De concentratie die in de metastudie is gehanteerd ligt tussen de concentratie van beide modellen in, wel is de kwelflux ongeveer een derde kleiner.

Over de invloed van schaalgrootte zegt deze vergelijking nog niets, doordat de invloed van de verschillen in parameterwaarden door de analyse heen speelt. De vergelijking geeft echter wel aan hoe gevoelig de modelresultaten zijn voor keuzes tijdens de modelbouw.

De invloed van de modelresolutie kan voor de Tholen-uitsnede uit het Zeeland model wel specifiek worden onderzocht, doordat hier dezelfde basisdata wordt toegepast. Uit de resultaten van dit model blijkt dat de variatie in de grondwaterstand en de kwelflux ruimtelijk veel gedifferentieerder is in het $25 \times 25 \text{ m}^2$ model. Dit komt doordat de invloed van de waterlopen met soms diepe ontwatering minder wordt uitgemiddeld over een modelcel. De verwachting was dat deze detaillering van de kwelflux zou leiden tot een toename van de zoutvracht, zoals in de experimenten met het profielmodel is aangetoond. De berekeningen

³ Momenteel (2008-2011) wordt binnen het Interreg IV-B project Cliwat (www.cliwat.eu) onderzoek gedaan naar de (huidige) zoet-brak-zout verdeling binnen delen van Zeeland zoals Schouwen-Duiveland en Perkpolder. Daarbij worden verschillende technieken met elkaar vergeleken om zodoende de zoet-brak-zout verdeling nader te bepalen. Het gaat naast analyses (monsters) om met name geofysische methoden als TEC, boorgatmetingen, ConePenetrationTests (CPTs), EM31 en zelfs Airborne Electrical Magnetic (AEM) waarbij helikopters worden gebruikt. Meer informatie op de site zoetzout.deltares.nl

met de verschillende resoluties van het Tholenmodel ($250 \times 250 \text{m}^2$, $100 \times 100 \text{m}^2$ en $25 \times 25 \text{m}^2$) laten echter zien dat bij hogere resoluties de zoutvracht juist afneemt. Dit is het gevolg van het feit dat de kwelflux bij lagere resoluties (sterker) overschat wordt vanwege een niet geheel correcte opschaling van de waterlopen. Bij hogere resoluties wordt deze fout kleiner en daarmee de kwelflux en diens gevolge ook de zoutvracht. Dit effect domineert in de modelresultaten.

Als voor dit effect wordt gecorrigeerd, geldt voor $t=0$ (2010) wel dat er een hogere zoutvracht wordt berekend bij hogere modelresoluties. Dit kan echter niets met de hierboven genoemde verbeterde simulatie van de opkegeling onder waterlopen te maken hebben, omdat deze opkegeling op $t=0$ nog geen effect heeft gesorteerd op de chlorideconcentratie verdeling. Op $t=0$ geldt dat de relatie tussen de modelresolutie en de zoutvracht een artefact is welke het gevolg is van toenemende correlatie tussen de initiële chlorideconcentratie verdeling en kwel bij toenemende modelresolutie.

De Tholen modellen zijn alle 10 jaar doorgerekend. Na 10 jaar kan een verbeterde opkegelingssimulatie wel resulteren in verbeterde zoutvrachtberekeningen. De resultaten (indien gecorrigeerd voor het schalingseffect op de kwel) laten inderdaad zien dat de bij hogere modelresolutie de toename in de zoutvracht met de tijd sterker is. Het effect is echter vrij gering. Mogelijk wordt het effect na langere tijd sterker, al laten de perceelsmodellen van Hoofdstuk 3 zien dat zelfs een (voor een regionaal model) hoge resolutie van 25×25 meter niet voldoende is om de opkegeling bij waterlopen goed te simuleren.

Daarmee zijn de belangrijkste conclusies van de voorliggende studie de volgende:

- De modelresolutie is potentieel van grote invloed op de berekende zoutvrachten, zoals blijkt uit de perceelsmodellen van Hoofdstuk 3; verbeterde simulatie van de opkegeling onder waterlopen leidt tot hogere zoutvrachten;
- Deze grote invloed blijkt vooralsnog niet uit de regionale modelleringen, m.n. uit de exercities met de verschillende resoluties van het Tholenmodel. Mogelijk is de gesimuleerde periode te kort geweest om de effecten goed in beeld te krijgen, maar het is ook duidelijk geworden dat zelfs de hoogste toegepaste resolutie ($25 \times 25 \text{m}$) niet voldoende is om de opkegeling bij de waterlopen goed te simuleren.
- De huidige methode van modelopschaling leidt tot een significante overschatting van de kwel, en daarmee tot fouten in de berekening van de zoutvrachten; het effect van de hogere modelresolutie op de kwelflux domineert het effect van de hogere modelresolutie op de simulatie van de opkegeling bij de totstandkoming van de zoutvracht (in het onderzochte geval);
- Verschillende modellen (NHI zoet-zout, Zeeland model, PZH) leiden tot sterk verschillende modelresultaten in dezelfde gebieden. De modelresolutie en de eventuele verschillen hierin tussen de modellen spelen daarbij een ondergeschikte rol. De modelresultaten zijn erg gevoelig voor bepaalde keuzes voor modelschematiseringen en parametrisaties. Een hoofdrol is daarbij weggelegd voor de initiële chlorideconcentratie verdeling.

6.2 Aanbevelingen

Deze studie heeft de mogelijke invloed van schaafeffecten op zoutvracht aangetoond, en verschillen in berekende zoutvrachten van rond de factor 2 tussen verschillende modellen (NHI, Zeeland model, PZH) zichtbaar gemaakt. De resultaten van de zoet-zoutmodellen zijn dus gevoelig voor zowel schematiseringen/parametrisaties als modelresoluties. Dit wetende is meer onderzoek gewenst om:

- een beter beeld te krijgen van de waarde van de door de verschillende modellen berekende zoutvracht. Deze berekende zoutvracht moet tevens vergeleken worden met metingen;
- de chlorideconcentratie verdeling beter te kunnen schatten. De chlorideconcentratie verdeling is erg onzeker, maar sterk bepalend voor het resultaat. Het is cruciaal meer metingen uit te voeren om deze verdeling beter in de vingers te krijgen; binnenkort zullen de resultaten van het Interreg IV-B project Cliwat een eerste indicatie geven.
- een antwoord te krijgen op de vraag waarom in het NHI zoveel meer kwel wordt berekend voor Goeree-Overflakkee dan in het PZH model. Samen met de chlorideconcentratie verdeling bepaalt de kwel namelijk de zoutvracht, en inzicht in de oorzaak van het verschil tussen NHI en PZH kan een handvat bieden de kwelmodellering te verbeteren;
- naast de invloed van horizontale discretisatie ook inzicht te krijgen in de invloed van verticale discretisatie op de resultaten;
- de lange-termijneffecten van een hogere resolutie te verkennen, door de exercitie met het Tholenmodel op verschillende resoluties (naast 250m, 100m, 25m ook kleiner, bijv. 5m voor deelgebieden) ook voor langere tijdsperioden (50-100 jaar) uit te voeren. Daarnaast zou het zinvol zijn om ook andere deelgebieden aan een dergelijke analyse te onderwerpen, om algemeen geldende uitspraken te kunnen doen.
- te bekijken in hoeverre ook met een $25 \times 25 \text{ m}^2$ resolutie er nog overschatting van de kwelflux optreedt als gevolg van afgevlakte stijghoogteverlopen nabij drainagemiddelen.

7 Referenties

Baaren, E., van, Oude Essink, G.H.P., Janssen, G., De Louw, P.G.B., Heerdink, R., Goes, B., (2011) (in voorbereiding). Verzoeting Verzilting Grondwater in de Provincie Zeeland - 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel. Deltares Rapport, Utrecht.

De Lange, W.J. (1998). On the errors involved with the parametrization of the MODFLOW River and drainage packages. In: MODFLOW '98, Volume 1, ed. E. Poeter, Z. Zheng, M. Hill, 249-256.

Louw, P. G. B. de, Oude Essink, G. H. P., Stuyfzand, P. J., & Zee, S. E. A. T. M. van der. (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands. Journal of Hydrology, 394(3-4), 494-506. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.10.009.

De Vries, A, Veraart, J., De Vries, I., Oude Essink, G., Zwolsman, G, Creusen, R., Buijtenhek, H. (2009). Vraag en aanbod van zoetwater in de Zuidwestelijke Delta - een verkenning.

Geldof, G. (2010). Complexiteit in het waterbeheer: een persoonlijke top 5. H2O 2010/22.

Haitjema, H., Kelson, V., De Lange, W.J. (2001). Selecting MODFLOW cell sizes for accurate flow fields. Groundwater, 39 - 6, 931-938.

Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, Weixing. (2007). SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, 39 p.

Minnema, B., Kuijper, M.J.M., Oude Essink, G.H.P. en Maas, C. (2004) Bepaling toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland. TNO rapport NITG 04-189-B, 86 p.

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

Oude Essink, G.H.P., De Louw, P.G.B., de, Baaren, E.S., van, Vliet, M. van, et al. (2008). Zoet-zout studie Provincie Flevoland, Deltares-rapport 2008-U-R0546/A, 160 p.

Oude Essink, G. en Baaren, E.S., van (2009). Verzilting van het Nederlandse grondwatersysteem. Deltares rapport, Model versie 1.3, 2009-U-R91001.

Oude Essink, G.H.P., Louw, de, P., Stevens, S., de Veen, B., de, Prevo, C., Marconi, V. en Goes, B. (2009). Meetcampagne naar het voorkomen van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland, 2007-U-R0925/A, 132p.

Oude Essink, G.H.P., E.S. van Baaren, and P.G.B. de Louw (2010a), Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, Water Resour. Res., 46, W00F04, doi:10.1029/2009WR008719.

Oude Essink, G., Delsman, J., Borren, W., Stuurman, R., Verkaik, J. (2010b). Veranderingen in het grondwatersysteem van het Markermeergebied; Rapportage DC project Wetlands in het IJsselmeergebied. Deltares rapport 1202830-000, 118 p.

Oude Essink, G. en Verkaik, J. (2010). Verzilting en verzoeting van het grondwater systeem in Nederland onder invloed van klimaatscenario's, gebruikmakend van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium module Zoet-Zout. Deltares memo 1202273-000-BGS-005, Utrecht.

Pebesma, E. (2009). Threedimensional interpolation of subsurface chloride concentrations in the Netherlands, 12 p.

Roelofsen, F., Goorden, N. et al. 2008. Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht), Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwateronttrekking DSM Delft - Technisch rapport, Deltares rapport 2008-U-R1084/A, 196 p.

Snepvangers, J.J.J.C, Berendrecht, W.L. et al. 2007. MIPWA: Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer, TNO rapport 2007-U-R0972/A, 283 p.

Stuurman, R., Baggelaar, P., Berendrecht, W., Buma, J., Louw, P., de, Oude Essink, G.H.P. (2008). Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO rapport, i.o.v. VROM, 2008-U-R0074/B, 85 p.

Vermeulen, P.T.M., Te Stroet, C.B.M., Heemink, A., (2006). Limitations to upscaling of groundwater flow models dominated by surface water interaction. Water Resour. Res. 42-W10406.

Voortman, B., (2010). De dynamiek van regenwaterlenzen in de provincie Zeeland – ontwikkeling van een 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel op perceelsschaal. Universiteit Utrecht / Deltares afstudeerscriptie, begeleiders P. Schot en G. Oude Essink & P. de Louw.

A Korte beschrijving MOCDENS3D

MOCDENS3D

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport is MOCDENS3D (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt et al., 2003). De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig geïntegreerd zijn: 1. MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988) aangepast voor dichtheidafhankelijke grondwaterstroming, en 2. MOC3D (Konikow et al., 1996) voor de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater. De code is een samenvoeging van state-of-the-art software op het gebied van zowel grondwaterstroming als stoftransport. Met MOCDENS3D is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren. Deze code bestaat uit een module voor grondwater en een module voor stoftransport die aan elkaar gekoppeld zijn. Voorafgaand is MOCDENS3D toegepast in een flink aantal zoet-zout studies in Nederland.

Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In het grondwatersysteem van de Nederlandse kust is de dichtheidsverdeling in de kustzone zodanig dat er rekening moet worden gehouden met het effect van dichtheidverschillen op de grondwaterstroming. Omdat zout grondwater zwaarder is dan zoet (of brak) grondwater, beïnvloedt het de stroming van water in de ondergrond. Zo kan zout grondwater in een natuurlijk hydrogeologisch systeem (dus zonder externe spanningen als onttrekkingen of peilverlagingen) door drukverschillen zoet grondwater wegdrücken (de welbekende zoutwaterintrusie in watervoerende pakketten). Aan de andere kant kan zoet grondwater, doordat het lichter is, juist op het zoute grondwater blijven drijven en in grote mate een min of meer geïsoleerd grondwatersysteem in stand houden. Zo drijft in het Nederlandse duingebied zoet grondwater (dichtheid van 1000 kg/m³) op zout grondwater (dichtheid van ongeveer 1022 kg/m³), in de vorm van een zoetwaterlens.

Correcties naar zoetwaterstijghoogte

Terwijl onder normale omstandigheden (d.w.z. met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet je in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles omrekenen naar drukken. Opgeloste stoffen in het grondwater verhogen namelijk de druk. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten waar het grondwater niet zoet is gecorrigeerd voor de dichtheid. Om dit aspect mee te nemen moet de stijghoogte worden omgerekend naar een zogenaamde equivalente zoetwaterstijghoogte. De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk. Zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert, en betekent een gradiënt in zoetwaterstijghoogte niet automatisch dat er stroming van grondwater optreedt. De noodzakelijke correcties voor de dichtheid kunnen significant zijn: een filterbuis gevuld met 20 m zout grondwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 20.5 m: een verschil van 0.5m (Santing, 1980; Oude Essink, 2001; Post et al., 2007).

- Oude Essink, G. H. P. 2001. Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands.
- Post, V.E.A., H. Kooi, C.T. Simmons. 2007. Using Hydraulic Head Measurements in Variable-Density Ground Water Flow Analyses. Ground Water: DOI 10.1111/j.1745-6584.2007.00339.x
- Santing, G. 1980. Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten. H2O 13(22): 544-548.