

# Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland

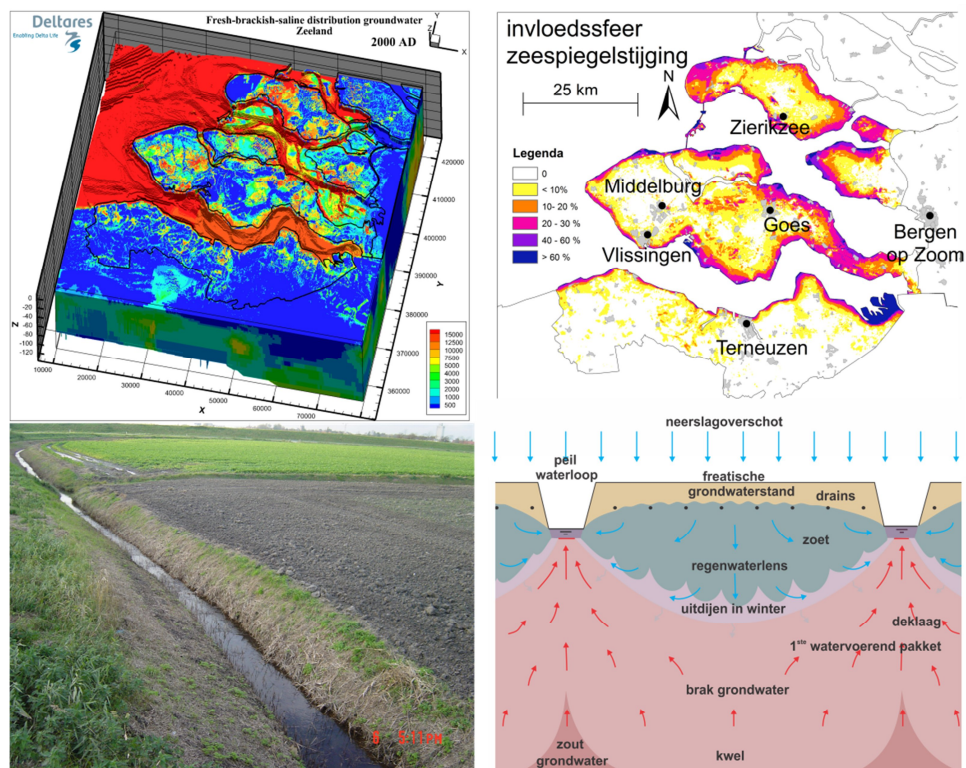


**Zeeland model:**  
3D regionaal zoet-zout grondwater



# Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland

Zeeland model: 3D regionaal zoet-zout grondwater



1220185-000





## Titel

Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Provincie Zeeland	1220185-000	1220185-000-BGS-0003	86

## Trefwoorden



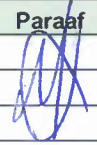

Zeeland model, verzilting-verzoeting grondwater, Provincie Zeeland, zoet-zout grondwater, 3D, kalibratie, autonome verzilting, effecten klimaatverandering en zeespiegelstijging

## Samenvatting

Dit rapport beschrijft een numeriek model van het regionale grondwatersysteem van de Provincie Zeeland. De gesimuleerde stroming van grondwater en gekoppeld zouttransport is provincie-dekkend, drie-dimensionaal (3D), dichtheidsafhankelijk en niet-stationair. Het model is gebaseerd op databanken zoals het hydrogeologische model REGIS Zeeland, een maaiveldhoogtebestand (AHN) en oppervlaktewaterpeilen (TOP10-vector). Het model is geijkt op basis van (zoetwater)stijghoogten. Het model berekent de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater op regionale schaal onder invloed van de effecten van klimaatverandering (verandering in neerslag- en verdampingspatroon) en zeespiegelstijging. Een viertal scenario's zijn doorgerekend over de periode 2010-2050. Een kleinere grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar zal in de toekomst zorgen voor een verlaging van zowel de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket als de grondwaterstand. In de winter verandert de grondwaterstand en de stijghoogte echter nauwelijks in gebieden met drainage omdat het overtollige (regen)water direct wordt afgevoerd. De grondwateraanvulling neemt in het zomerhalfjaar door klimaatverandering af. Omdat de grondwaterstand dientengevolge wegzakt maar de stijghoogte nauwelijks verlaagt, neemt de kwel in de meeste kwelgebieden toe. In de winter is het effect op de kwelfluxen significant minder omdat het neerslagoverschot grotendeels (direct) wordt afgevoerd via het drainagesysteem van sloten en drainage buizen. De zoet-brak-zout verdeling bevindt zich nog steeds niet in een dynamische evenwichts-situatie. Het effect van een zeespiegelstijging of een verandering in grondwateraanvulling is klein ten opzichte van het autonome verziltings- en verzoetingsproces. Over het algemeen komt verzilting vaker voor dan verzoeting. De zoutvracht neemt overwegend toe, in absolute zin voornamelijk op Schouwen-Duiveland. De invloedssfeer van een zeespiegelstijging in het eerste watervoerend pakket is beperkt tot de eerste honderden meters tot enkele kilometers vanuit de kustlijn. De stijghoogte neemt in deze zone toe, net als de kweldruk. De freatische grondwaterstand neemt door zeespiegelstijging nauwelijks toe door de aanwezigheid van een Holocene deklaag.

## Citeren als:

Van Baaren E.S., Oude Essink G.H.P., Janssen G.M.C.M., de Louw P.G.B., Heerdink R., Goes B. 2016. Verzoeting en verzilting van het grondwater in de Provincie Zeeland; Regionaal 3D model voor zoet-zout grondwater, Deltares rapport, 86 p.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Okt. 2016	Esther van Baaren		Pieter Pauw		Marijn Kuijper	
		Gualbert Oude Essink					
		Gijs Janssen					
		Perry de Louw					
		Ruth Heerdink					
		Bart Goes					

## Status

Definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Inleiding	1
1.2	Aanleiding en doelstellingen onderzoek	2
1.3	Activiteiten op hoofdlijnen en rapportages deelonderzoeken	4
1.4	Context met overig verziltingsonderzoek Provincie Zeeland	5
1.5	Definities zoet-brak-zout grondwater	7
1.6	Aanpak en afbakening en voorziene resultaat	7
1.7	Leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Achtergrondinformatie invoerbestanden</b>	<b>9</b>
2.1	Ontstaansgeschiedenis Zeeland	9
2.2	Geologie: kartering van de ondergrond	11
2.3	3D chloride concentratie verdeling aan de hand van metingen	12
2.4	KNMI06-klimaatscenario's	14
<b>3</b>	<b>Het 3D zoet-zout grondwater model</b>	<b>17</b>
3.1	Inleiding	17
3.2	Modelleren van variabele grondwaterstroming en gekoppeld zout transport	17
3.2.1	MOCDENS3D	17
3.2.2	Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming	18
3.2.3	Correcties naar zoetwaterstijghoogte	18
3.3	Eigenschappen model	18
3.4	Modelranden en randvoorwaarden	19
3.5	Geologie en hydraulische parameters in het numerieke model	20
3.6	Hydrologie: bepaling van het AHN	21
3.6.1	Introductie	21
3.6.2	Stappen in de AHN-Filtering	22
3.6.3	Hydrologisch maaiveld (HSURF) en waterpeil voor sloten en meren (HWL)	24
3.7	Chloride concentratie verdeling in het grondwater	25
3.8	Onttrekkingen	29
3.9	Oppervlaktewatersysteem	30
3.9.1	Ligging waterlopen	30
3.9.2	Waterpeilen	32
3.9.3	Conductance waterlopen	34
3.9.4	Chloride concentratie oppervlakte waterlopen	35
3.10	Drainage	36
3.11	Grondwateraanvulling	37
<b>4</b>	<b>Kalibratie</b>	<b>39</b>
4.1	Inleiding	39
4.2	Kalibratiedata	39
4.2.1	Samenstelling van de kalibratieset	39
4.2.2	Toekenning van de meetreeksen aan het modelgrid.	40
4.2.3	Zoet-zoutcorrectie en statistische verwerking van de meetreeksen	41
4.2.4	Aanvullende afgevallen meetreeksen	43
4.3	Kalibratiemethode	44
4.3.1	Kalibratiealgoritme en schematisatie	44

4.3.2	Gevoeligheidsanalyse	45
4.3.3	Regularisatie	46
4.4	Kalibratieresultaat	46
<b>5</b>	<b>Modeluitkomsten</b>	<b>49</b>
5.1	Inleiding	49
5.2	Stijghoogte eerste watervoerend pakket zomer	51
5.3	Stijghoogte eerste watervoerend pakket winter	52
5.4	Grondwaterstand zomer	53
5.5	Grondwaterstand winter	54
5.6	Kwel en infiltratie zomer	56
5.7	Kwel en infiltratie winter	57
5.8	Chloride concentratie onderkant deklaag	58
5.9	Zoutvracht zomer	60
5.10	Zoutvracht winter	62
5.11	Diepte zoet-zout grensvlak 1500 mg Cl <sup>-</sup> /l	64
5.12	Diepte grensvlak 10.000, 1000, 300 en 150 mg Cl <sup>-</sup> /l	67
5.13	Invloedssfeer van een zeespiegelstijging	67
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>69</b>
6.1	Inleiding	69
6.2	Conclusies	69
6.3	Aanbevelingen	71
<b>7</b>	<b>Literatuur</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Bijlagen</b>	<b>77</b>
	<b>A</b> Definities zoet-brak-zout grondwater	
	<b>B</b> Gerelateerde zoet-zout studies	
	<b>C</b> Parameteraanpassingen tijdens kalibratie	

# 1 Introductie

## 1.1 Inleiding

Het grondwatersysteem van de Provincie Zeeland maakt deel uit van Laag-Nederland. In Zeeland bevindt zich het grootste deel van het maaiveld rondom Normaal Amsterdams Peil (NAP). Hoogteverschillen in maaiveld zijn over het algemeen gering. Een belangrijk kenmerk van Zeeland is dat het (overwegend zoute) buitenwater nooit ver weg is en dat vrijwel elke afwateringseenheid direct op het buitenwater kan lozen. Al vanaf de Middeleeuwen is in Zeeland land aangewonnen. Met name in de Gouden 17<sup>de</sup> Eeuw hebben op grote schaal (50.000 ha) bedijkingen plaatsgevonden (Schultz, 1992; Van De Ven, 1993).

De verdeling van zoet, brak en zout grondwater in de Provincie Zeeland is complex. Hier liggen verschillende oorzaken als geologische ontstaansgeschiedenis en inpolderingen gedurende de laatste eeuwen aan ten grondslag. Vrijwel overal is het (diepe) grondwater grotendeels brak tot zout. Boven in de ondergrond is meestal nog wel een laag zoet grondwater aanwezig, welke in dikte varieert.

Er zijn verschillende manieren om grondwaterlichamen in te delen. De Kaderrichtlijn Water geeft globale aanwijzingen voor het begrenzen van grondwaterlichamen: via bodemkundige eenheden, stroomgebied of naar de mate van onttrekkingen voor menselijke consumptie. In de karakterisatie van het stroomgebied van de Schelde zijn een vijftal typen grondwaterlichamen uitgewerkt (Regionaal Bestuurlijk Overleg Schelde, 2004): 1. het grondwater in de duingebieden (met de Kop van Schouwen als grootste gebied), 2. het bovenste grondwater in de klei-veengebieden, 3. het grondwater in de zandige lagen, 4. het grondwater in de diepe zandige laag onder de ondoorlatende klei, en 5. het grondwater voor menselijke consumptie (bijv. bij Haamstede en Sint Jansteen waar oppervlaktewater wordt geïnfilteerd).

In dit rapport worden de volgende drie zoete grondwaterlichamen beschouwd (Rijkswaterstaat, 2009; Werkgroep Grondwater KRW Schelde, 2008):

1. Diepe zoetwatervoorkomens in de grotere duingebieden, zoals de Kop van Schouwen-Duiveland. Het zoete grondwater reikt een diepte van meer dan 100 m onder NAP,
2. Zoetwaterlenzen onder kreekruigen (gebieden met dekzanden) en onder duingebiedjes. De diepste zoetwaterlenzen reiken tot 30 m onder NAP,
3. Dunne zoete neerslaglenzen of regenwaterlenzen, maximale dikte orde van decimeters tot enkele meters, komen in het grootste deel van Zeeland voor. In de landelijke gebieden kwelt brak tot zout grondwater omhoog, en daarbovenop drijven de zoete neerslaglenzen of regenwaterlenzen. De sloten naast de lenzen zijn vaak brak tot zout water. Zonder deze lenzen is landbouw niet mogelijk. Zelfs op de lage gronden dichtbij de kust zijn regenwaterlenzen aanwezig alhoewel deze lenzen zeer dun zijn en eerder (licht) brak dan zoet.

Het zoete tot brakke grondwater in de diepe zandige lagen onder de Boomse Klei wordt niet apart meegenomen in deze analyse.

In Zeeland zijn veel voorbeelden van efficiënt gebruik van zoet water. Er vindt immers al eeuwenlang succesvol landbouw plaats, zonder dat er veel zoet oppervlaktewater beschikbaar is. Landbouw is mogelijk gebleken door de aanwezigheid van de kleiige



Holocene deklaag, omdat deze laag regenwater beter kan vasthouden en weerstand biedt tegen het omhoog stromen van zout grondwater (in dit rapport verder 'zoute kwel' genoemd).

Zeker in droge zomers kwelt het zoute grondwater op, maar zolang het brakke water in de sloot niet nodig is om gewassen te beregenen is dat zelden een probleem. Voor veel gewassen, zoals granen, grassen en suikerbieten is een hoge zoutconcentratie ook niet zo'n probleem (Van Bakel and Stuyt, 2011; Stuyt et al., 2016; Stuyt and Rijk, 2006), maar voor veel bodems die beregend moeten worden om de aanwezige gewassen te vrijwaren voor droogte- en zoutschade is het zoete regenwater meestal niet voldoende. Zodoende zijn agrariërs in de delta van oorsprong beperkt in hun gewaskeuze.

Naar alle verwachting zullen in de loop van deze eeuw diverse ontwikkelingen plaatsvinden die de beschikbaarheid van zoetwater in de Zuidwestelijke Delta beïnvloeden. De belangrijkste ontwikkelingen die worden verwacht zijn (De Vries et al., 2009):

- het vaker voorkomen van droge, warme zomers (zoals die van 1976 of 2003) met een hoger dan gemiddeld neerslagtekort (Klein Tank et al., 2015; KNMI, 2006). Hierdoor zal in de zomer mogelijk vaker, en in grotere hoeveelheden, zoetwater vanuit het hoofdwatersysteem in het regionale watersysteem moeten worden ingelaten;
- het stijgen van de zeespiegel en het mogelijk vaker voorkomen van zeer lage rivierafvoeren als gevolg van klimaatverandering. Hierdoor zal de zoutbelasting van het gebied toenemen door de steeds zouter wordende kwel en zal meer zout water via de Nieuwe Waterweg binnendringen (Beijk, 2008). De toename van de zoute kwel zal enigszins verder worden versterkt door een beperkte bodemdaling<sup>1</sup>;
- de voortzetting van de huidige trend in de verandering van het landgebruik: meer (kapitaalintensieve) zoutgevoelige en watervragende teelten (De Vries et al., 2009);
- het zout maken van het Volkerak-Zoommeer, waardoor de slechte zoetwaterkwaliteit in het meer zal verdwijnen; en tenslotte;
- het op een kier zetten van de sluizen in de Haringvlietdam (indien van toepassing) waardoor het zoutgehalte in het westelijke deel van het Haringvliet zal toenemen.

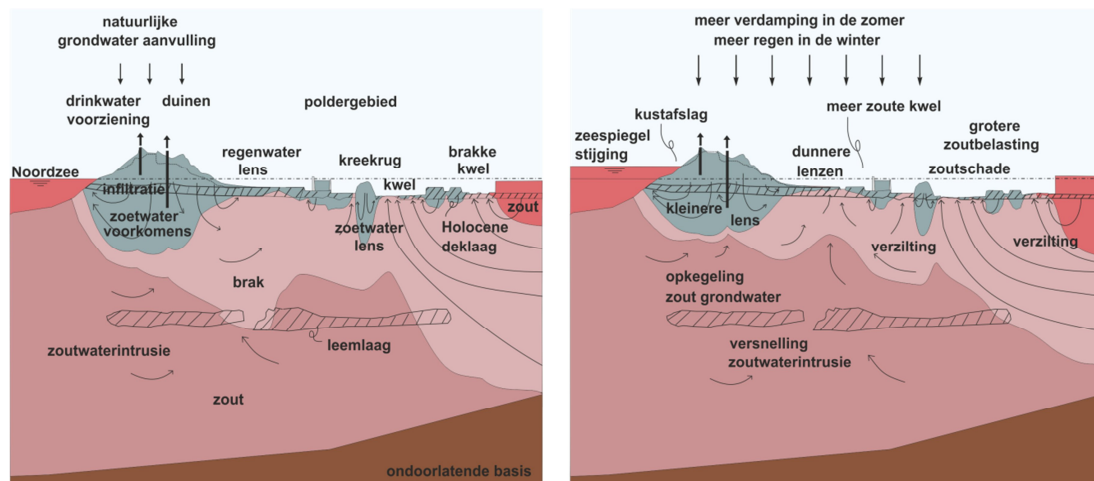
Verzilting van het grond- en oppervlaktewater systeem kan leiden tot zoetwatertekorten voor gewassen en ecologische schade in (zoetwater)natuurgebieden (Figuur 1.1).

## 1.2 Aanleiding en doelstellingen onderzoek

Halverwege de jaren 2000 was in de Provincie Zeeland in beperkte mate kennis beschikbaar over de dynamica van zoet-zout processen en de interactie met complexe geologische setting. In opdracht van de Provincie Zeeland is in 2005 het langjarig Verziltingsonderzoek "*Verzoeting-verzilting van het grondwater in de Provincie Zeeland*" gestart om verschillende aspecten van het zoet-zout grondwatersysteem te onderzoeken. Sindsdien hebben de intensieve meetcampagnes, theoretische beschouwingen en modelleringen het kennisniveau over het grondwatersysteem sterk verbeterd. Tevens is rond dezelfde tijd de complexe geologie digitaal beschikbaar gekomen (Staffleu et al., 2010, 2011).

---

<sup>1</sup> In de Zuidwestelijke Delta is de bodemdaling beperkt omdat uitgestrekte veen formaties zoals die aanwezig zijn in het Groene Hart niet vóórkomen (Haasnoot et al., 1999).



Figuur 1.1 Vereenvoudiging van het regionale grondwatersysteem in delen van de Provincie Zeeland (inclusief de duingebieden): a. huidige situatie en b. toekomstige situatie. Diepe zoete grondwatersystemen komen voor in de grotere duingebieden en kreekkruggen, terwijl zout grondwater naar de diepere poldergebieden omhoog stroomt ('zoute kwel'). In deze polders zijn dunne neerslaglenzen aanwezig. Zoutwaterintrusie vindt op regionale schaal plaats omdat het gemiddeld polderpeil lager ligt dan het gemiddeld zeeniveau, terwijl op lokale schaal zoetwater onder kreekkruggen en dunne neerslaglenzen landbouw mogelijk maakt. In de toekomst staat het zoete tot brakke grondwatersysteem verder onder druk.

Hoofdoel van dit Verziltingsonderzoek is de ontwikkeling geweest van inzichten over het grondwatersysteem in de Provincie Zeeland. Het onderzoek is opgesplitst in twee deelonderzoeken:

- a. Vergroten van het inzicht in de huidige situatie van de mate van verzilting en verzoeting van het grondwater in de provincie. Specifieke onderdelen zijn:
  - het bepalen van de factoren die verzilting en verzoeting veroorzaken en ontwikkelen van een hypothese van verzilten en verzoeten;
  - het vergroten van kennis over de dynamische regenwaterlenzen door middel van een meetcampagne op veldlocaties;
  - het vergroten van kennis over de wijze waarop zoute kwel zich manifesteert aan het oppervlak.
- b. Ontwikkelen en toepassen van een regionaal modelinstrumentarium ter kwantificering van de huidige én toekomstige verzilting en verzoeting van het freatisch grondwater en de veranderingen in de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in de provincie, onder invloed van een zeespiegelstijging en een veranderend neerslag- en verdampingspatroon. Specifieke onderdelen zijn:
  - het simuleren van de huidige en toekomstige verziltingsprocessen van het grondwater met behulp van verschillende typen numerieke dichtheidsafhankelijke grondwater modellen;
  - het berekenen van veranderingen in het stijghoogtepatroon in het eerste watervoerend pakket onder invloed van klimaatverandering, zeespiegelstijging en menselijke handelen;
  - het voorspellen van de effecten van klimaatverandering (verandering in neerslag- en verdampingspatroon) en zeespiegelstijging op de (middel)lange termijn op de omvang van de regenwaterlenzen en de zoete grondwatervoorraden onder kreekkruggen (betreffende de precieze winbare hoeveelheid zoet grondwater);

- het voorspellen van de effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging op kwel en infiltratie fluxen van het grondwater naar het oppervlaktewatersysteem;
- het analyseren en kwantificeren van de effectiviteit van technische waterbeheersmaatregelen (op regionale schaal) ter bestrijding van de verzilting.

### 1.3 Activiteiten op hoofdlijnen en rapportages deelonderzoeken

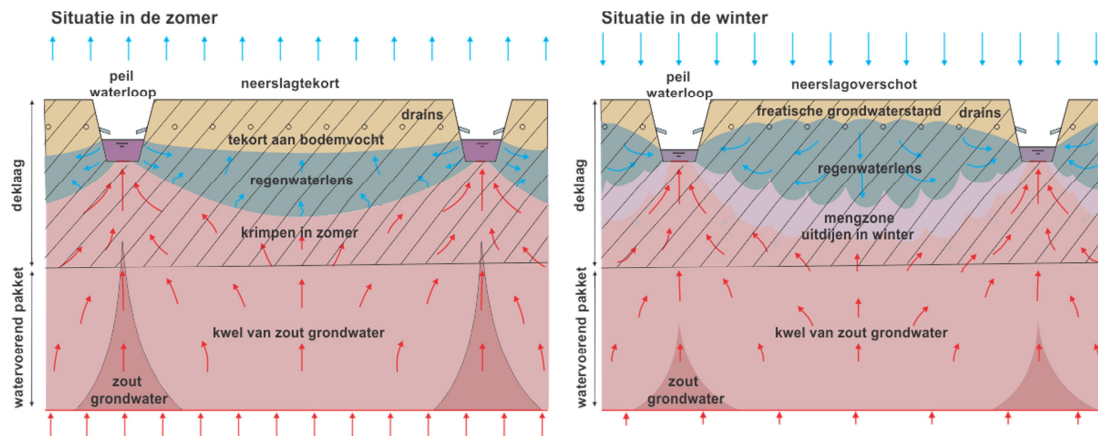
Deelonderzoek (a) is tijdens de jaren na 2005 opgepakt. Binnen dit onderzoek zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- verzamelen en inventariseren van bestaande hydrologische, geohydrologische en geofysische informatie van de Provincie Zeeland. Er is hierbij gebruik gemaakt van kennis ontwikkeld onder REGIS (Vernes et al., 2010);
- opstellen van een conceptueel model van verzoeting- en verziltingsprocessen van het grondwater aan de hand van bovenstaande informatie;
- monitoren van de dynamiek van regenwaterlenzen door middel van een meetcampagne ter verificatie van de hypothese van verzilting en verzoeting (Figuur 1.2); er is op 27 percelen gemeten aan het vóórkomen en de dynamiek van dunne regenwaterlenzen.

De verschillende onderdelen van deelonderzoek (a) zijn vastgelegd in rapporten en wetenschappelijke peer-reviewed artikelen:

- Oude Essink et al. (2009), rapportage over de monitoring van regenwaterlenzen op 27 percelen.
- Goes et al. (2009), Near Surface Geophysics, artikel over het verkrijgen van een betrouwbare zoet-brak-zout verdeling in de Zeeuwse ondergrond aan de hand van metingen.
- De Louw et al. (2011), HESS, over dunne regenwaterlenzen in kwelgebieden
- De Louw (2013), Journal of Hydrology, over de bepalende factoren voor de dynamiek van regenwaterlenzen.
- De Louw (2013), proefschrift aan de Vrije Universiteit Amsterdam over de typering van ondiepe brakwatersystemen in Nederland en de effecten van verzilting.
- De Louw et al. (2015), het Nederlandse tijdschrift Landschap, over het vóórkomen van regenwaterlenzen.

Verder zijn op conferenties veel presentaties gegeven en posters gepresenteerd, zoals op de Salt Water Intrusion Meetings ([www.swim-site.org](http://www.swim-site.org)) (2010, 2012, 2014), AquaConSoil (2015) en Deltas in Times of Climate Change (2010, 2014).



Figuur 1.2 Schematische weergave van een dynamische regenwaterlens. Deze regenwaterlensen worden gevoed in de winter door overtollige neerslag en krimpen in beperkte mate door een neerslagtekort gedurende de zomerperiode. Gedurende het gehele jaar stroomt brak grondwater naar de sloten omdat het slootpeil laag ligt ten opzichte van de stijghoogte in het watervoerend pakket.

In dit rapport richten wij ons echter op deelonderzoek (b): de ontwikkeling van het regionale 3D numerieke model van het zoet-zout grondwatersysteem van de Provincie Zeeland die in de periode 2010-2015 is uitgevoerd. Dit model kan worden ingezet om het waterbeleid en –beheer betreffende de verziltingsbestrijding in Zeeland te ondersteunen.

Er is tevens een lokaal 3D zoet-zout grondwater model geconstrueerd van enkele landbouwpercelen te Schouwen-Duiveland (De Louw et al., 2011; Voortman, 2010). Hierbij hebben we meetgegevens van 27 percelen gebruikt om de zoet-brak-zout verdeling nauwkeuriger te bepalen (Oude Essink et al., 2009). Tevens zijn de effecten van een aantal KNMI klimaatscenario's op de lokale zoet-brak-zout grondwater verdeling uitgerekend (De Louw et al., 2011; Voortman, 2010).

#### 1.4 Context met overig verziltingsonderzoek Provincie Zeeland

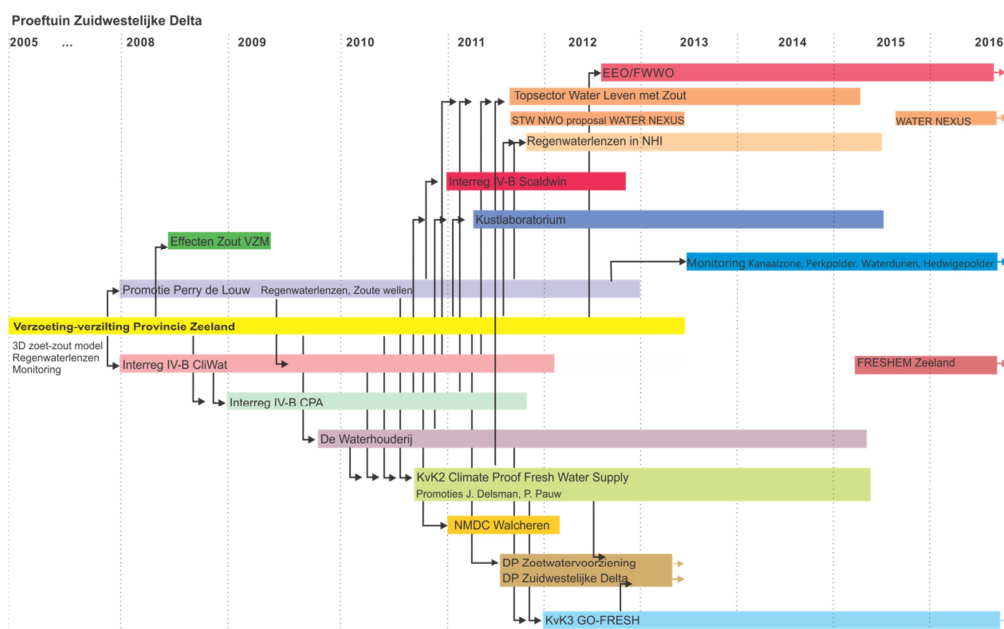
Dit verziltingsonderzoek is zodanig opgezet dat kennis opgebouwd in de deelonderzoeken gemakkelijk kon worden uitgewisseld; via meetcampagnes van regenwaterlensen (Oude Essink et al., 2009) naar hypothesen over hoe het zoet-zout grondwatersysteem werkt (De Louw et al., 2011), naar regionale en lokale modelinstrumentarium om het huidige systeem na te bootsen en de toekomstige situatie te voorspellen.

Bovendien is de afgelopen jaren veel kennis over het grondwatersysteem in de Provincie Zeeland vastgelegd in de promotieonderzoeken van De Louw (2013), Pauw (2015), Vos (2015) en Zuurbier (2016). Ten slotte zal in 2017 de zoet-zout karakterisatie van de Zeeuwse ondergrond openbaar beschikbaar komen als belangrijkste resultaat van het FRESHEM project (Bijlage 8B, item 18).

Feitelijk heeft dit verziltingsonderzoek in de Provincie Zeeland een aanzet gegeven van een reeks van vervolgprojecten waar zoet-zout grondwater een belangrijke rol speelt (Figuur 1.3):

- het genoemde promotie onderzoek van Perry de Louw (De Louw, 2013),
- de studie Effecten zout Volkerak-Zoommeer op grondwatersysteem (Oude Essink et al., 2008a),

- de EU Interreg-projecten CLIWAT (geofysische meettechnieken als Airborne EM) en Climate Proof Areas (Schouwen-Duiveland) (Harbo et al., 2011),
- de monitoringcampagnes Waterdunen (Buma et al., 2008b), Perkpolder (Buma et al., 2008a) en Kaneel Gent-Terneuzen (van Baaren et al., 2014),
- de metastudie Zuid-Westelijke Delta (De Vries et al., 2009),
- het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium, in de vergelijking tussen regionaal versus landelijk (De Lange et al., 2014)
- de Waterhouderij, met focus op Walcheren,
- het project *Climate Proof Fresh Water Supply* (Kennis voor Klimaat, tranche 2, thema 2, WP2, najaar 2010 – najaar 2014): binnen dit programma zijn een aantal onderwerpen die zijn aangetipt in het Verziltingsonderzoek verder onderzocht, zoals de bepaling van de toekomstige zoetwatervoorraad onder kreekruggen/duinen, het opschalen van het lokale perceelsituatie naar een provincie dekkend beeld (voor de Kreekrug Infiltratie Proef voor Walcheren door Sommeijer (2013) en Sommeijer et al. (2013)), de interactie zoet-zout grondwater en oppervlaktewater tijdens droge perioden, en zoete grondwatervoorraden onder invloed van grondwateronttrekkingen (Pauw et al., 2016). In het proefschrift van Pieter Pauw zijn een aantal artikelen over deze problematiek opgenomen (Pauw, 2015; Pauw et al., 2015).
- Scaldwin (Interreg IV-B), grensoverschrijdende modellering Vlaanderen, Lebbe et al. (2012),
- Nationaal Modellen en Data Centrum, project Kritische Zone (Walcheren),
- Hydrologische Studie Kustlaboratorium voor het Zeeuws Landschap (van Baaren et al., 2012).
- Effecten van een zouter Kanaal Gent-Terneuzen op het grondwatersysteem (Faneca Sánchez and Oude Essink, 2015)
- Ondergrondse wateropslag in de drie proeven van GO-FRESH (Pauw et al., 2015; Zuurbier et al., 2015).



Figuur 1.3 Schematische weergave van de Zeeuwse projecten in de Proeftuin Zuidwestelijke Delta als een functie van de tijd; het grondwater speelt in alle projecten een belangrijke rol; resultaten van het ene project dient als basis voor het volgende.



De gemeenschappelijke deler naast proceskennis en meetgegevens in ondiep grondwater is vaak ook het regionale 3D zoet-zout grondwater model (in conceptvorm geleverd). In de laatste projecten is gaandeweg ook sprake van stakeholderparticipatie, kennisoverdracht en implementatie innovatieve oplossingen voor een robuuste en flexibele zoetwatervoorziening (bijv. de Waterhouderij). In Bijlage 8B staan de projecten uitgebreider beschreven die gerelateerd zijn aan dit verziltingsonderzoek.

## 1.5 Definities zoet-brak-zout grondwater

Omdat in dit rapport vaak wordt gesproken over zoet, brak en zout grondwater, is het belangrijk een duidelijke definitie over te geven. Er worden meerdere klasse-indelingen van zoet, brak en zout grondwater gebruikt, afhankelijk van het gebruiksdoel. Zo heeft de term zoet grondwater voor een bloembollenkweker een andere betekenis dan voor een agrariër die suikerbieten verbouwd. Voor de drinkwatervoorziening is de klasseindeling van Stuyfzand gangbaar (Stuyfzand, 1993), zie Bijlage 8A, maar zijn indeling – vijf klassen tot 1000 mg Cl<sup>-</sup>/l – focust zich op zoet grondwater. In de Provincie Zeeland heeft de Stuyfzand indeling niet zoveel zin omdat chloride concentraties kleiner dan 150 mg Cl<sup>-</sup>/l van nature nauwelijks voorkomen (buiten de diepe zoetwaterlenzen onder bijv. de Kop van Schouwen). Zout is in Zeeland zo gewoon, dat een andere definitie van zoet-brak-zout grondwater wordt gehanteerd dan in de rest van Nederland: we introduceren hier *landbouwkundig zoet*, zijnde 1000 mg Cl<sup>-</sup>/l als de grens tussen zoet en brak grondwater. Deze grens van 1000 mg Cl<sup>-</sup>/l wordt overigens ook in het buitenland veel gebruikt (Todd, 1980). Voor zoet, brak en zout grondwater hanteren we in deze rapportage de volgende intervallen:

- **zoet** (landbouwkundig): chloride concentratie grondwater < 1000 mg/l,
- **brak**: chloride concentratie tussen 1000 mg/l en 3000 mg/l,
- **zout**: chloride concentratie > 3000 mg/l

Enkele andere getallen zijn:

100 mg Cl <sup>-</sup> /l	Rijnwater dat de grens overkomt
150 mg Cl <sup>-</sup> /l	Drinkwaternorm (Waterleidingbesluit van 2001) <sup>2</sup>
250 mg Cl <sup>-</sup> /l	Veelgebruikte grenswaarde voor innamepunten drinkwater in West-Nederland
450 mg Cl <sup>-</sup> /l	Maximaal zoutgehalte in VZM, huidige situatie

## 1.6 Aanpak en afbakening en voorziene resultaat

Het resultaat van dit deelonderzoek is een geïjkt regionaal 3D model van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en daaraan gekoppeld zoet-zout transport. Met het modelinstrumentarium kunnen uitspraken over het Zeeuwse grondwatersysteem op regionale schaal worden gedaan, voor nu en in de toekomst. Het modelgebied is weergegeven in Figuur 1.4. De resolutie van de modelcellen is 100\*100 m<sup>2</sup>. Er zijn 40 modellagen gedefinieerd waarbij de bovenste modellagen (rond het freatische grondwater) slechts 0.5 m dik zijn. Hierdoor kunnen kwelfluxen en de ondiepe zoetwatervoorraad in het topsysteem beter nauwkeuriger bepaald worden.

De resultaten van de Provincie Zeeland worden in dit rapport gepresenteerd. Met het model is o.a. de invloedssfeer van een zeespiegelstijging berekend en zijn de effecten van een veranderend neerslag- en verdampingspatroon gekwantificeerd. Het detailniveau van de invoerdata van België en de Provincie Noord-Brabant dat binnen het modelgebied valt is onvoldoende om resultaten van deze gebieden te presenteren; dit valt ook buiten de opdracht. Ook zijn geen resultaten getoond van de Provincie Zuid-Holland. Voor deze

<sup>2</sup> <http://www.lennotech.nl/elementen-en-water/vergelijking-drinkwaternormen.htm>

provincie is al eerder een soortgelijke modelstudie uitgevoerd. De resolutie van dat model was lager (modelcellen van  $250 \times 250 \text{ m}^2$ ) en geologische opbouw was minder gedetailleerd weergegeven. Meer informatie over verzilting en verzoeting van het grondwater in de Provincie Zuid-Holland is terug te vinden in Kuijper et al. (2005); Minnema et al. (2004); Oude Essink et al. (2008); Oude Essink et al. (2010).



Figuur 1.4: Grootte van het modelgebied (zwarte kader)

## 1.7 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft achtergrondinformatie over de ontstaansgeschiedenis van Zeeland, de geologie in Zeeland (Stafleu *et al.*, 2010), de bestaande zoet-zout metingen en de KNMI06-klimaatscenario's. In hoofdstuk 3 wordt de geometrie van het 3D zoet-zout grondwater model besproken en passeren verschillende invoerbestanden zoals het AHN (maaiveld) de revue. In hoofdstuk 4 wordt de kalibratie beschreven, en in hoofdstuk 5 de modelresultaten. Conclusies en aanbevelingen worden benoemd in hoofdstuk 6, en het rapport sluit af met een literatuurverwijzing en bijlagen.

## 2 Achtergrondinformatie invoerbestanden

### 2.1 Ontstaansgeschiedenis Zeeland

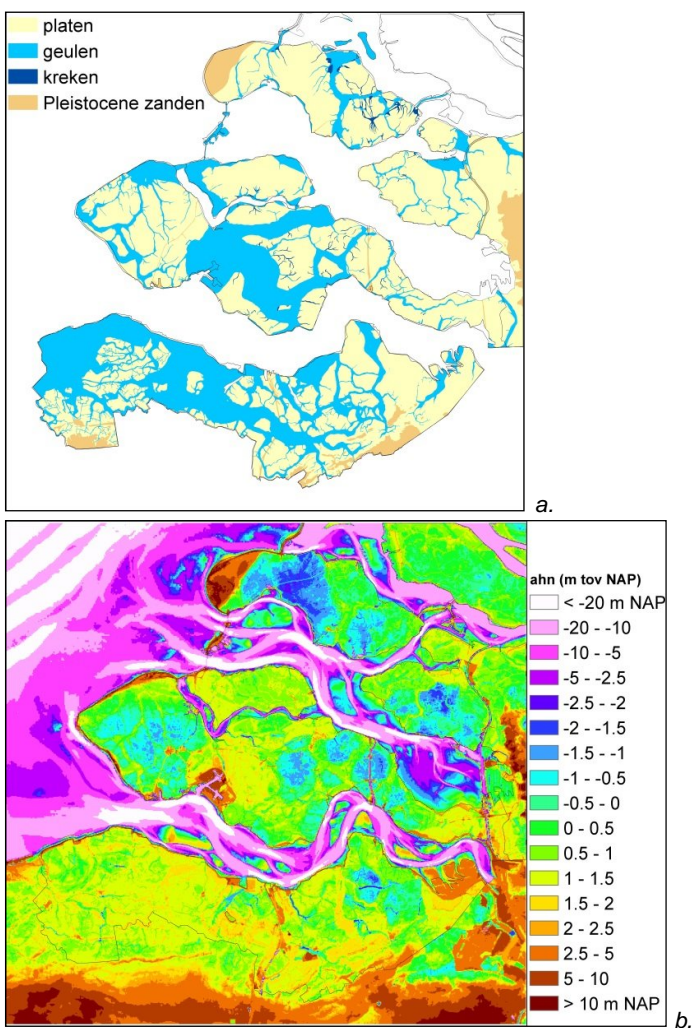
De geologische ontwikkeling van Zuidwest Nederland is in hoge mate bepaald door de relatieve Holocene zeespiegelstijging (transgressie) in combinatie met getijden, met een extra grote amplitude in de zeearmen (de Kraker, 2015; Van de Plassche, 1982). De grote rivieren (Rijn, Waal, Maas, Schelde) hebben bovendien de morfologische ontwikkeling in sterke mate beïnvloed (Vos, 2015).

De zeespiegelstijging na het einde van de laatste ijstijd (Pleistoceen) leidde allereerst tot een stijging van het grondwater in de kustvlakte, waardoor veen werd gevormd (het Basisveen). Dit werd bedekt door klei en vervolgens wadafzettingen als gevolg van de voortdurende zeespiegelstijging. De afzettingen zijn tot ver ten oosten van de huidige kustlijn afgezet.

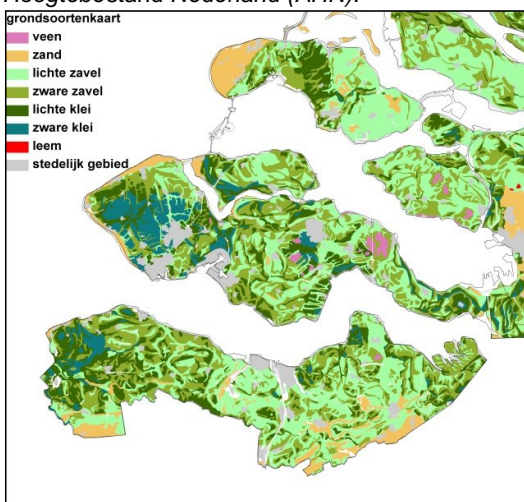
Toen de kust door strandwallen sloot, verlandde het getijdengebied hierachter en werd weer veen gevormd (het Hollandveen). Na 1000 BC werden de strandwallen plaatselijk doorbroken en vond sterke erosie plaats doordat de zee het land binnendrong. Hierdoor erodeerde het Hollandveen deels en ontstond er weer een geulenpatroon. De overstromingen zetten mariene sedimenten af die nu voor het grootste deel aan de oppervlakte liggen. In de Middeleeuwen is op grote schaal veen afgegraven voor de zoutwinning. Dit heeft erosie van het veengebied tijdens latere transgressies in de hand gewerkt. De Schelde heeft tot 1400AD afgewaterd via de Oosterschelde, daarna nam de Westerschelde in belang toe.

De Pleistocene sedimenten bestaan voornamelijk uit dekzand. Deze komen aan het oppervlak langs de grens met België in Zeeuws Vlaanderen en in Brabant (Brabantse Wal). Het dekzandoppervlak helt af richting het noordwesten: in de richting van de kust. Deze Pleistocene gronden zijn in de lage delen van Zeeland bedekt door een pakket Holocene afzettingen dat in de richting van de kust steeds dikker wordt. Deze afzettingen zijn over het algemeen 20 m dik maar bereiken in oude getijdengeulen een dikte tot 40 m. Aan de kust komen zandige duinafzettingen voor.

De krekken (getijdegeulen) vormden tijdens de Holocene transgressie de laagste delen van het landschap. Als ze niet meer actief waren slibden ze geleidelijk dicht. Vanaf de 11<sup>de</sup> eeuw kreeg de mensheid significante invloed op het watersysteem in het gebied. Dijken werden aangelegd en ontwatering vond plaats door sloten en andere watergangen te graven. Dit ging gepaard met inklinking van de veenlagen in de ondergrond en met rijping van de klei. Hierdoor daalde het maaiveld. Omdat de veenlagen in de vroegere krekken al waren verdwenen en omdat de opvulling van de krekken vaak uit zandig materiaal bestond klonk de bodem van de oude krekken veel minder in dan in de omgeving. Hierdoor kwamen de dichtgeslibde krekken hoger te liggen dan de omgeving (de zogenaamde reliëfinversie). We spreken dan ook van kreekruggen, de hoger gelegen delen van het landschap, terwijl de lager gelegen delen poelgronden worden genoemd. De hoogteverschillen tussen beide zijn nog verder toegenomen doordat de veenlagen in de poelgebieden voor een groot deel zijn afgegraven voor de winning van turf en zout. Hier en daar is ook de bovenste kleilaag verwijderd voor de steenbakkerijen. De kreekruggen (Figuur 2.1a) zijn duidelijk zichtbaar op de maaiveldkaart (Figuur 2.1b) en kunnen tot 2 m hoger liggen dan het omringende landschap (De Vries et al., 2009).



Figuur 2.1: a. kartering van platen, geulen, kreken en Pleistocene zanden (REGIS) en b. Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN).



Figuur 2.2: Grondsoortenkaart (Alterra, <http://www.wur.nl/nl/show/Grondsoortenkaart.htm>).

2.2 Geologie: kartering van de ondergrond

Definition of hydrogeological model of Zeeland				
Geology unit / Formation / Layer package	Hydrogeology unit	Appearance in Zeeland	South	North
Naaldwijk ( Schoort)	NASC-p-1		Phreatic package	Phreatic package
Naaldwijk (Zandvoort)	NAZA-z-1			
Antropogeen ( Oppervlakte grond)	AAOP-c			
Naaldwijk ( Walcheren)	NAWA-z-1		Top layer	Top layer
	NAWA-z-2			
	NAWA-z-3			
Nauwkoop ( Hollandveen)	NHO-v-1			
Naaldwijk ( Schoort)	NASC-p-2			
Naaldwijk ( Wormer)	NAWO-z-1			
Naaldwijk (Zandvoort)	NAZA-z-2			
Naaldwijk ( Wormer)	NAWO-z-2			
Naaldwijk (Zandvoort)	NAZA-z-3			
Naaldwijk ( Wormer)	NAWO-z-3			
Nauwkoop ( Bisschoven)	NBA-v-1			
Boxtel	BX-z-1		Aquifer	Aquifer
	BX-k-1			
	BX-z-2			
BX-k-2				
BX-z-3				
BX-k-3				
Kraftshage ( Wijkven)	KRW-k-1			
Kraftshage ( Wijkven)	KRW-k-2			
Kraftshage ( Wijkven)	KRW-k-3			
Kraftshage ( Wijkven)	KRW-k-4			
Beegden ( Rosmalen)	BE-z-1			
	BE-k-1			
	BE-z-2			
gecombineerde Eem in Wouderberg	WB-z-1			
	WB-v-1			
	WB-z-2			
Kraftshage ( Zutphen, Twello)	KRW-k-1			
	KRW-k-2			
	KRW-k-3			
Drente ( Lissens, Giesse)	DR-z-1			
	DR-k-1			
	DR-z-2			
gecombineerde gestuifde afzettingen Boezel / Drachten	DT-z-1			
	DT-k-1			
	DT-z-2			
Urk ( Tyne)	UR-z-1			
	UR-k-1			
	UR-z-2			
Peelo	PE-z-1			
	PE-k-1			
	PE-z-2			
Urk ( Veenthuizen)	UR-z-3			
	UR-k-2			
	UR-z-4			
sterker	ST-z-1			
	ST-k-1			
	ST-z-2			
Appelscha	AP-z-1			
	AP-k-1			
	AP-z-2			
Stramproy	SY-z-1			
	SY-k-1			
	SY-z-2			
gecombineerde Peize en Waalse	PZWA-z-1			
	PZWA-z-2			
	PZWA-z-3			
Maeswijk	MS-z-1			
	MS-k-1			
	MS-z-2			
Kiezeloliet	KI-z-1			
	KI-k-1			
	KI-z-2			
Oosterhout	OO-z-1			
	OO-k-1			
	OO-z-2			
Breda	BR-z-1			
	BR-k-1			
	BR-z-2			
Rijpt ( Boom)	RU-z-1			
	RU-k-1			
	RU-z-2			
Tongeren ( Zatewa/Waterloer)	TO-z-1			
	TOEWA-k-1			
	TO-z-2			
Dongen ( Assa, Heper)	DO-z-1			
	DOAS-k-1			
	DO-z-2			
	DOE-k-1			

De geohydrologische schematisatie van het grondwatermodel is gebaseerd op het hydrogeologische model REGIS Zeeland (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem van Zeeland). REGIS Zeeland is gebaseerd op gegevens uit de DINO-databank<sup>3</sup>, waaronder boorgatmetingen, boorbeschrijvingen, grondwaterstanden en grondwaterkwaliteit. Hieruit is ruimtelijke informatie afgeleid, zoals de laagopbouw van de ondergrond. TNO heeft de uitgebreide kartering van de deklaag (inclusief de hydraulische weerstand) uitgevoerd. Hierbij zijn alle boringen uit de DINO-database nader beschouwd en zijn lithostratigrafische lagen in de deklaag onderscheiden. Eind 2000's zijn tevens doorlatendheidsmetingen uitgevoerd voor de verschillende lithostratigrafische klassen. In Vernes et al. (2010) is de hydrogeologische opbouw en hydraulische eigenschappen van Holocene afzettingen uitgebreid beschreven. Voor elke laag is in samenspraak met TNO een eerste schatting van hydraulische doorlatendheid gegeven, die tijdens de kalibratie is aangepast.

De REGIS Zeeland kartering geeft inzicht in de 3D verdeling van watervoerende pakketten (zandlagen) en slechtdoorlatende lagen (o.a. klei, veen en lemlagen). De gebruikte indeling voor Zeeland is weergegeven in Figuur 2.3. Er is geen gebruik gemaakt van de zogenaamde GEOTOP-kartering; tijdens het aanmaken van de geologie in het numerieke model was deze database nog niet digitaal beschikbaar.

Figuur 2.3: De geologische, geohydrologische en hydrogeologische opbouw van de ondergrond van Zeeland.

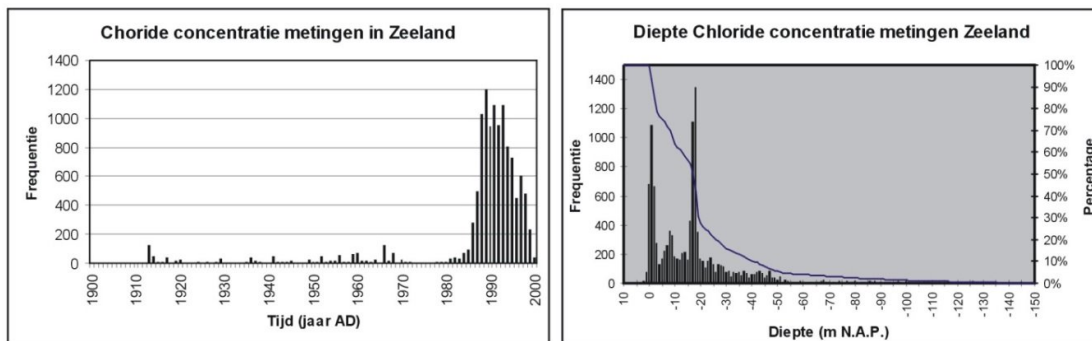
<sup>3</sup> <https://www.dinoloket.nl/>



### 2.3 3D chloride concentratie verdeling aan de hand van metingen

Voor de bepaling van de 3D verdeling van zoet-brak-zout grondwater is gebruik gemaakt van de uitgebreide databestanden die bij TNO in beheer zijn (DINO Qua; zoet-zout REGIS; zie ook Kloosterman (2007) en Oude Essink et al. (2005)). De betrouwbaarheid van de initiële verdeling van zoet-brak-zout grondwater is sterk afhankelijk van het aantal metingen en de ruimtelijke verdeling van deze metingen. De drie typen data aanwezig in Zeeland zijn chloride concentratie metingen van het grondwater, VES-metingen en boorgatmetingen. De 3D zoet-brak-zout kartering van het onderzoeksprogramma FRESH (FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland) is pas begin 2017 beschikbaar, zodat in het huidige model de volgende bestaande metingen zijn gebruikt:

1. **Chloride concentratie metingen.** Ruim 11.823 in aantal in de Provincie van Zeeland, gemeten vanaf 1908. Slechts ongeveer 10% van de metingen ligt dieper dan -40 m NAP, terwijl ongeveer 60% van de metingen brak of zout grondwater betreft (juist deze waarden zijn waardevol voor de ruimtelijke bepaling van de zoet-brak-zout verdeling);

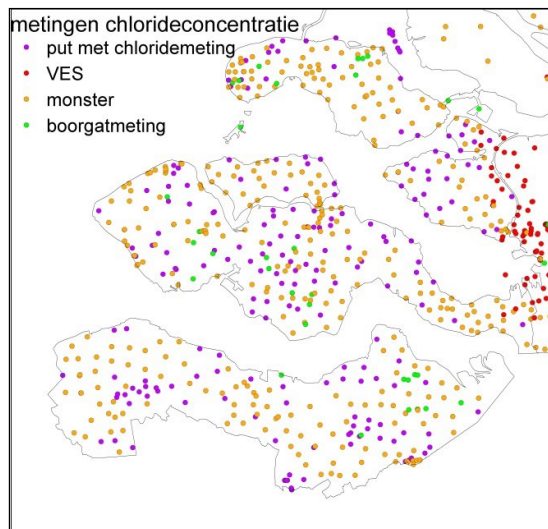


*Figuur 2.4: Histogrammen van chloride metingen in Zeeland: a. de frequentie van metingen als functie van jaar van meting; en b. aantal metingen per diepte en percentage als functie van de diepte. Zoals kan worden afgeleid, zijn de metingen bij grotere diepten schaars (slechts 10% van metingen ligt dieper dan -40 m NAP). De metingen zijn zeer frequent rond 0 m NAP (ondiep) en op ongeveer -17/-18 m NAP (over het algemeen net in het eerste watervoerende pakket).*

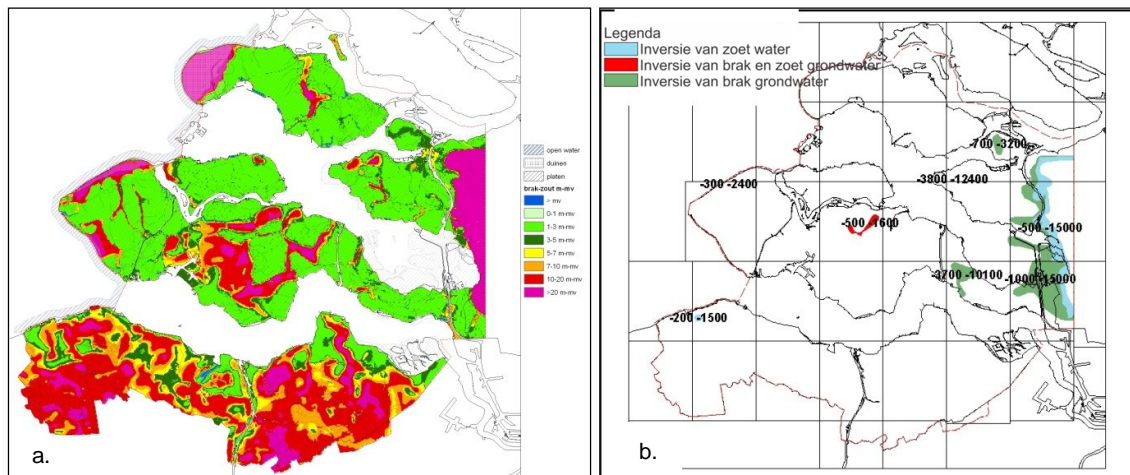
2. **VES-metingen.** Verticale Elektrische Sonderingen zijn geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak die informatie geven over de lithologie en het zoutgehalte van grondwater. In combinatie met de temperatuur van de ondergrond, het bicarbonaat ( $\text{HCO}_3$ )-gehalte van het grondwater en de geologische opbouw geeft een VES-meting een redelijke indicatie van het chloride concentratie van het grondwater.
3. **Boorgatmetingen.** Bij een boorgatmeting laat men een geofysisch apparaat (sonde) in een boorgat zakken en wordt de natuurlijke gamma straling en geo-elektrische geleidbaarheid gemeten. Op basis hiervan kan een schatting worden gemaakt van de hydrogeologische opbouw. De chloride concentratie is geschat op basis van een empirisch bepaalde relatie tussen het bicarbonaat-gehalte ( $\text{HCO}_3$ ) en de elektrische geleidbaarheid (EC 20°C) inclusief temperatuurcorrectie van de elektrische weerstand van het grondwater (TNO-IGG, 1992).

De 3D initiële zoet-brak-zout verdeling is bepaald met data uit bovenstaande databanken. Aan de hand van deze data/puntenwolk, alsmede geïnterpoleerde waarden volgens ZZREGIS (Kloosterman, 2007), is via een geostatistische methode een continue 3D chloride concentratie verdeling gecreëerd (Goes et al., 2009; Pebesma, 2009). Als in sommige gebieden het aantal metingen beperkt is kan in die gebieden het aldus gecreëerde continue 3D chloride concentratie verdeling onrealistische waarden geven. Een mooi voorbeeld van

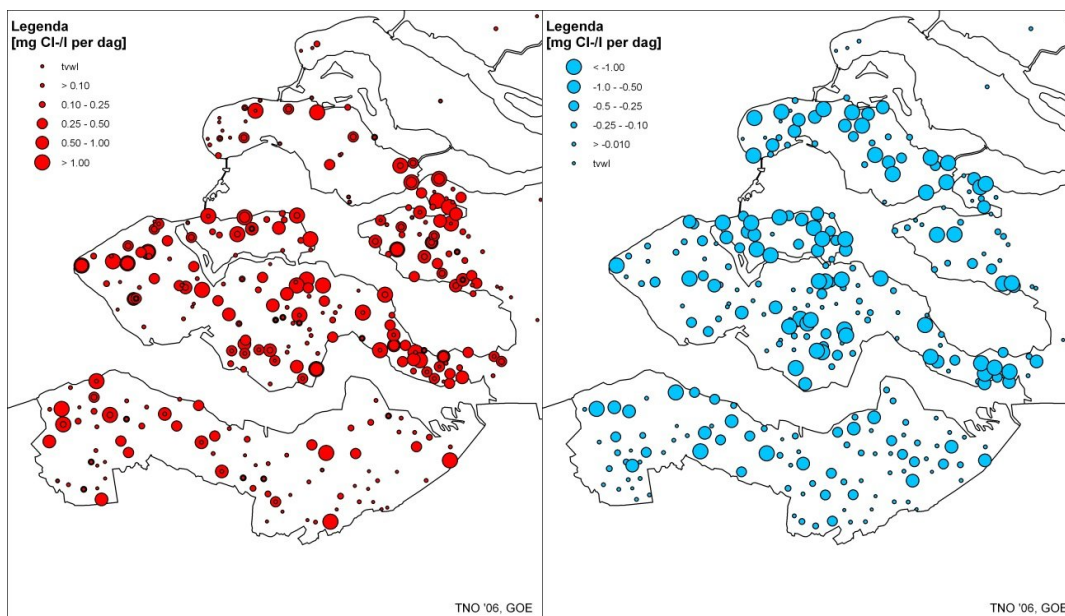
foutieve waarden is een inversie van zout-zoet grondwater in een goed doorlatend watervoerend pakket. Zo'n zogenaamde numerieke inversie is van nature onstabiel en zal in het numerieke model snel verdwijnen door dichtheidsstromingen en meningsprocessen van zout en zout grondwater. Om de grootste numerieke inversies eruit te filteren, is het numerieke model gebruikt om door een simulatie van een flink aantal jaren 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 2.5: Putten met chloridemetingen, monsters en boorgatmetingen (VES metingen in Zeeland zijn niet afgebeeld).



Figuur 2.6: a. Brak-zout grensvlak (1000 mg Cl/l), b. Gebieden waar zout-brak-zoet inversies in de Zeeuwse ondergrond voorkomen (Goes and Vernes, 2010).



Figuur 2.7: Verziltig en verzoeting in observatiebuizen in de Provincie Zeeland. De gekleurde bollen geven de locatie aan waar de chloride concentratie minimaal twee keer is gemeten. Karakteristieken: a. in ongeveer 20% van de putten is maar twee keer gemeten; b. op één locatie is er 64 keer gemeten; c. op sommige locaties zijn meerdere filters aanwezig op verschillende diepten; en d. alleen tijdreeksen langer dan 5 jaar zijn weergegeven. Zowel verziltig (toename chloride concentratie als een functie van de tijd) als verzoeting van het grondwater treedt op. Bron: DINO Qua (Bader, 2006).

## 2.4 KNMI06-klimaatscenario's

De veranderingen in neerslag, verdamping en zeespiegelstijging zijn gehaald uit de KNMI 2006 klimaatscenario's voor 2050 (en 2100) (KNMI, 2006); deze waarden verschillen nauwelijks van de waarden zoals gegeven in de uitgebrachte klimaatscenario's van 2014 (Klein Tank et al., 2015)<sup>4</sup>. In deze scenario's wordt op basis van aannames over wereldwijde temperatuurstijging en luchtstromingspatronen een overzicht van verwachte veranderingen weergegeven. Deze veranderingen hebben betrekking op temperatuur, neerslag en wind gedifferentieerd naar winter en zomer, evenals verwachte zeespiegelstijging. De KNMI'06 scenario's volgen de WB21-scenario's op. In deze scenario's vormde 1 graad temperatuurstijging tot 2050 (en 2 graden stijging in 2100) nog het middenscenario. In de KNMI06-scenario's is 1 graad temperatuurstijging tot 2050 en 2 graden tot 2100 min of meer het lage scenario. Wereldwijde projecties kunnen op regionale schaal zeer verschillende uitkomsten geven. Onder andere om deze reden bestaat er in hoge mate onzekerheid omtrent de snelheid waarmee het klimaat in ons land verandert. In Tabel 2.1 staat een overzicht van alle vier scenario's, tot het jaar 2010.

<sup>4</sup> Uit (Klein Tank et al., 2015), p. 27: "De recente wetenschappelijke inzichten in het nieuwste IPCC-rapport, waarop KNMI14 is gebaseerd, verschillen maar in beperkte mate van die in het vorige IPCC-rapport, waarop KNMI'06 is gebaseerd. Daarom lijken de algemene klimaatveranderingen in de KNMI14-scenario's zoals beschreven op bladzijde 7 sterk op de algemene veranderingen in de KNMI06-scenario's. Dit geeft aan dat de algemene kenmerken van de scenario's robuust zijn."

Tabel 2.1 De vier scenario's voor klimaatverandering tot 2100 (KNMI, 2006, maar zie ook [www.knmi.nl/klimaatscenario's](http://www.knmi.nl/klimaatscenario's)).

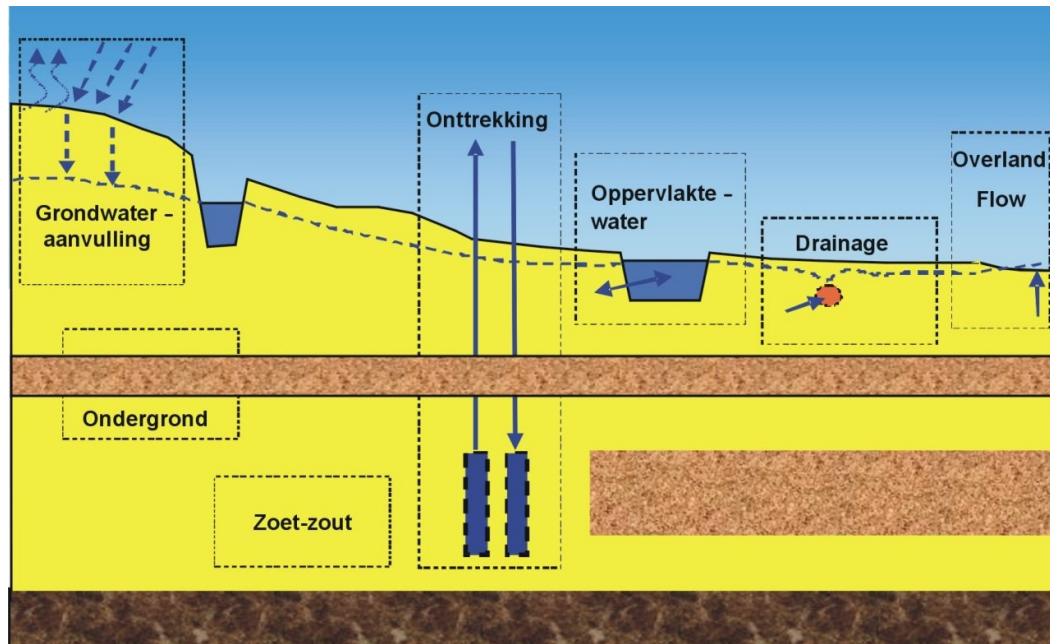
<b>2100</b>		<b>G</b>	<b>G+</b>	<b>W</b>	<b>W+</b>
Wereldwijde temperatuurstijging in 2050		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Wereldwijde temperatuurstijging in 2100		+2°C	+2°C	+4°C	+4°C
Verandering luchtstromingspatronen West Europa		nee	ja	nee	ja
<b>Winter</b>	gemiddelde temperatuur	+1,8°C	+2,3°C	+3,6°C	+4,6°C
	koudste winterdag per jaar	+2,1°C	+2,9°C	+4,2°C	+5,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	7%	14%	14%	28%
	aantal natte dagen ( $\geq 0,1$ mm)	0%	2%	0%	4%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	8%	12%	16%	24%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-1%	4%	-2%	8%
<b>Zomer</b>	gemiddelde temperatuur	+1,7°C	+2,8°C	+3,4°C	+5,6°C
	warmste zomerdag per jaar	+2,1°C	+3,8°C	+4,2°C	+7,6°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	6%	-19%	12%	-38%
	aantal natte dagen ( $\geq 0,1$ mm)	-3%	-19%	-6%	-38%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	27%	10%	54%	20%
	potentiële verdamping	7%	15%	14%	30%
<b>Zeespiegel</b>	absolute stijging (cm)	35-60	35-60	40-85	40-85



### 3 Het 3D zoet-zout grondwater model

#### 3.1 Inleiding

Het numerieke model is 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, en een veranderend neerslag- en verdampingspatroon. De volgende aspecten zijn daarbij meegenomen: 1. de verandering in de stijghoogteverdeling in de ondergrond als een functie van de tijd, 2. de kwel en infiltratiefluxen, en 3. de zoutbelasting naar het oppervlaktewatersysteem. Het numerieke model kan dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en transport van zoet, brak en zout grondwater simuleren.



Figuur 3.1: De verschillende hydro(geo)logische concepten die worden meegenomen in de modellering.

In overleg met de Stuurgroep 'Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland' is een viertal scenario's doorgerekend, van het jaar 2010 tot het jaar 2050 (zie ook paragraaf 5.1):

- 1 **aut**: de referentie case met het autonome scenario;
- 2 **W+zss**: het klimaatscenario W+ met alleen zeespiegelstijging;
- 3 **W+gwa**: het klimaatscenario W+ met alleen verandering in grondwateraanvulling; en
- 4 **W+**: het klimaatscenario W+ met zeespiegelstijging en een verandering in grondwateraanvulling.

Door de componenten zeespiegelstijging en verandering in grondwateraanvulling ook apart te modelleren is het mogelijk de invloed van deze componenten los van elkaar te kwantificeren.

#### 3.2 Modelleren van variabele grondwaterstroming en gekoppeld zout transport

##### 3.2.1 MOCDENS3D

De softwarecode die gebruikt wordt is MOCDENS3D. De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig geïntegreerd zijn: 1. MODFLOW (Harbaugh et al., 2000; Harbaugh



and McDonald, 1988) aangepast voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming, en 2. MOC3D (Konikow et al., 1996) voor dispersief en advectief transport van zoet, brak en zout grondwater. De code is een samenvoeging van software op het gebied van zowel grondwaterstroming als zout transport. Met MOCDENS3D is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren. Voorafgaand aan deze studie is MOCDENS3D toegepast in een flink aantal andere 3D zoet-zout grondwater studies in Nederland, zoals in Nederlandstalige literatuur: Zuid-Holland (Kuijper et al., 2005; Minnema et al., 2004; Oude Essink et al., 2008b), Noord-Holland (Oude Essink, 2000; Van Vugt et al., 2003), Zeeland (van Baaren et al., 2012) en geheel Nederland (Oude Essink, 2007; Oude Essink and Verkaik, 2010), en in Engelstalige literatuur: Zuid-Holland (Oude Essink et al., 2010), Noord-Holland en Texel (Oude Essink, 2001b; Pauw et al., 2012), Friesland (Faneca Sánchez et al., 2012) en geheel Nederland (De Lange et al., 2014). Momenteel wordt de code SEAWAT (Langevin et al., 2008) wereldwijd het meest gebruikt om zoet-zout grondwater te modelleren. SEAWAT en MOCDENS3D zijn in veel opzichten gelijk aan elkaar.

### 3.2.2 Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In het Zeeuwse grondwatersysteem is de dichtheidsverdeling in de kustzone zodanig dat er rekening moet worden gehouden met het effect van dichtheidsverschillen 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/m<sup>3</sup>) in de vorm van een zoetwaterlens op zout grondwater (dichtheid van ongeveer 1022 kg/m<sup>3</sup>).

### 3.2.3 Correcties naar zoetwaterstijghoogte

Terwijl onder normale omstandigheden (d.w.z. met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet men 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 fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet evident. 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 0.5 m (Oude Essink, 2001a; Post et al., 2007; Santing, 1980).

## 3.3 Eigenschappen model

Het numerieke grondwater model van de Provincie Zeeland is 3D. Het model is niet-stationair om veranderingen in het stijghoogtepatroon in het eerste watervoerend pakket en veranderingen in zoetwatervoorraden in het freatisch pakket te berekenen. Het simuleert dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld zout transport (zowel advectief als dispersief transport). De afmetingen van het model zijn van +6 m NAP tot -137 m NAP. Bovenin het grondwatersysteem is gekozen voor dunne modellagen (0.5 m) van +2 m tot -3

m NAP, om meer details in het freatisch watervoerend pakket te berekenen. De zoutvrachten naar het oppervlaktewatersysteem kunnen zodoende iets nauwkeuriger worden gemodelleerd. De modellagen nemen met de diepte in dikte toe. De celgrootte is 100x100 m<sup>2</sup>. Gebieden hoger dan +6 m NAP (bijv. de duinen) zijn fysiek niet meegenomen maar de opbolling van de grondwaterstand is wel verdisconteert in het model. De dikten van de modelcellen variëren van 0.5 m tot 10 m. Omdat de chloride concentratie en grondwaterstroming van dieper gelegen delen via het dichtheidseffect invloed heeft op het ondiepe grondwatersysteem is het diepere grondwatersysteem wel gemodelleerd, maar met grotere modellagen.

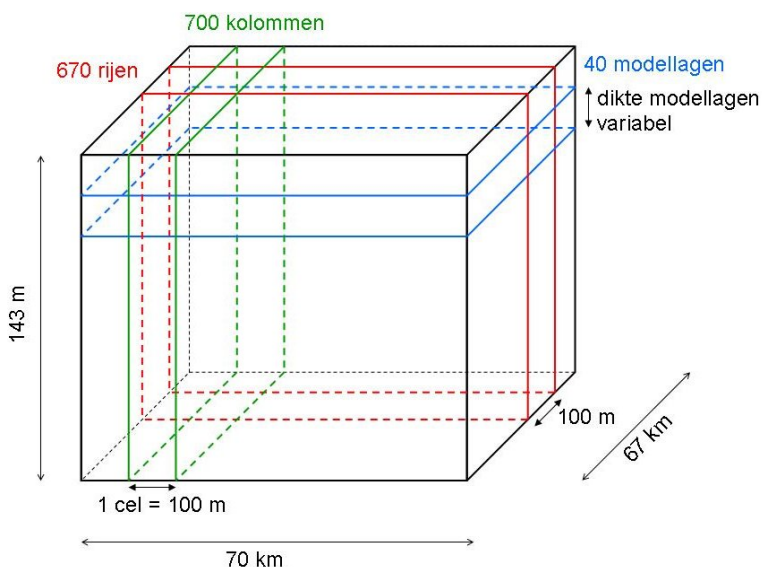
Van west naar oost is het model 70 km breed, van noord naar zuid is dit 67 km. Het model bevat 40 modellagen, om in de verticale richting genoeg resolutie te behouden om zout transport nauwkeurig te laten plaatsvinden. In totaal bevat het model 18.760.000 cellen (Figuur 3.2).

Het model is gekalibreerd op stijghoogten, en berekent veranderingen in het grondwatersysteem van 2010 tot 2050.

Tabel 3.1 Aantal en verschillende dikten van modellagen van het numerieke grondwater model.

Aantal modellagen	Dikte laag (m)	Boven- en onderkant (m NAP)
1	4.0	+6 – +2
10	0.5	+2 – -3
10	1.0	-3 – -13
11	4.0	-13 – -57
8	10.0	-57 – -137

Afmetingen grondwatermodel Zeeland

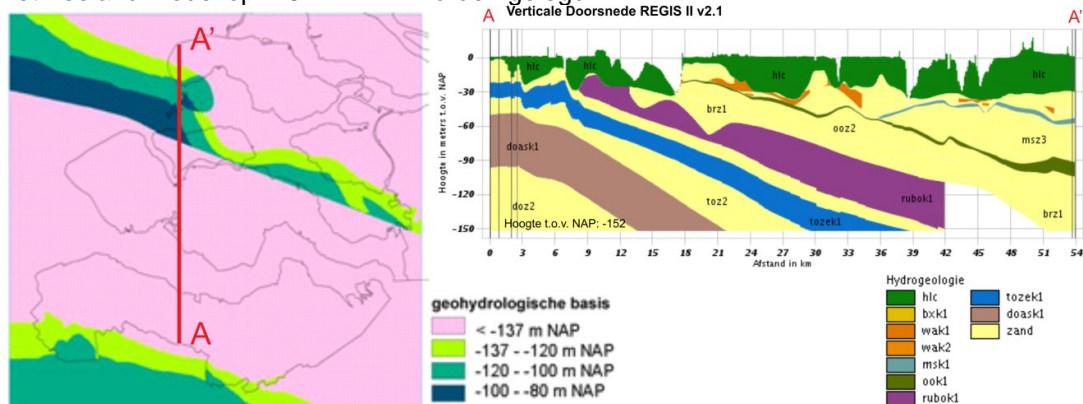


Figuur 3.2: Modelafmetingen van het Zeeland model. De bovenkant van het model ligt om +6 m NAP en de onderkant op -137 m NAP.

### 3.4 Modelranden en randvoorwaarden

De onderrand van het Zeeland model (-137 m NAP) wordt ondoorlatend verondersteld. Als de geohydrologische basis van Zeeland ondieper ligt dan deze onderrand van het Zeeland

model, dan wordt deze basis als ondoorlatende laag beschouwd. In een groot deel van het modelgebied ligt de geohydrologische basis echter dieper dan -137 m NAP; hier wordt dus de modelrand op -137 m NAP gebruikt als ondoorlatende basis. Deze keuze is legitiem: door aanwezige kleilagen met hoge hydraulische weerstand (Formatie van Rupel/Boomse klei en Formatie van Dongen/Asse/Ieper) heeft het nog diepere grondwatersysteem weinig invloed op het ondiepe grondwatersysteem waarin we geïnteresseerd zijn en kan de onderrand van het Zeeland model op -137 m NAP worden gelegd.



Figuur 3.3: Diepte van de geohydrologische basis zoals gekarteerd in REGIS. De sprong in basis over de Oosterschelde wordt veroorzaakt doordat in the zuidelijk deel ook de diepere lagen (zoals rubok1, toz1, tozek1, toz2, dosk1 en doz2, zie Figuur 2.3) worden meegenomen in het model; de basis komt hierdoor in het zuidelijk deel dieper te liggen.

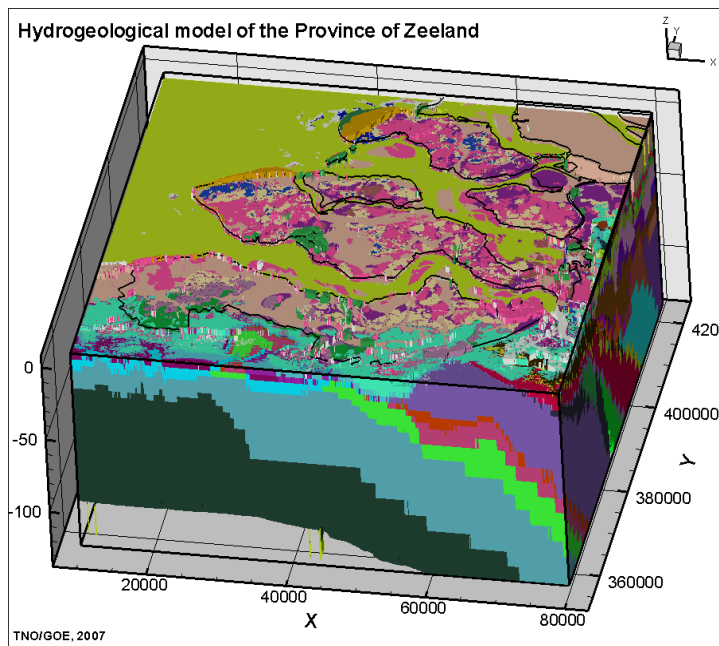
Voor de zijranden van het model is een vaste zoetwaterstijghoogte opgelegd, waarbij voor de dichtheid van het grondwater is gecorrigeerd. In de zee heeft de randvoorwaarde een hydrostatische druk verdeling (en is de opgelegde zoetwaterstijghoogte vanzelfsprekend gecorrigeerd door de dichtheid van zout zeewater). De Brabantse Wal ligt buiten het modelgebied maar heeft wel (veel) invloed op de grondwaterstroming in het model. Om de grondwaterflux vanuit de Brabantse Wal niet te verwaarlozen wordt deze in de randvoorwaarde verwerkt.

De bovenrandvoorwaarde wordt berekend aan de hand van waterlopen (paragraaf 3.6.3 en 3.9), drainage (paragraaf 3.10) en grondwateraanvulling (3.11), zie ook Figuur 3.1.

### 3.5 Geologie en hydraulische parameters in het numerieke model

Met het vastleggen van de numerieke schematisatie –de locatie van het centrum van elke cel is bekend- is het mogelijk de hydraulische parameters gebaseerd op de lithologie te vangen in het numerieke model. Elke cel heeft waarden voor de horizontale doorlatendheid<sup>5</sup> ( $K_h$ ) en verticale doorlatendheid ( $K_v$ ). De van tevoren vastgestelde waarde (van vóór de kalibratie) van de horizontale doorlatendheid is te vinden in Bijlage 8C. De verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid –ook wel verticale anisotropie- is in het model constant. De waarde van de anisotropie is moeilijk te bepalen, maar de gekozen waarde,  $K_h/K_v = 3$ , is conform de literatuur, bijv. Bear (1979).

<sup>5</sup> Doorlatendheid (grootheid  $LT^{-1}$ , en bijvoorbeeld eenheid m/dag) wordt ook wel hydraulische conductiviteit genoemd.



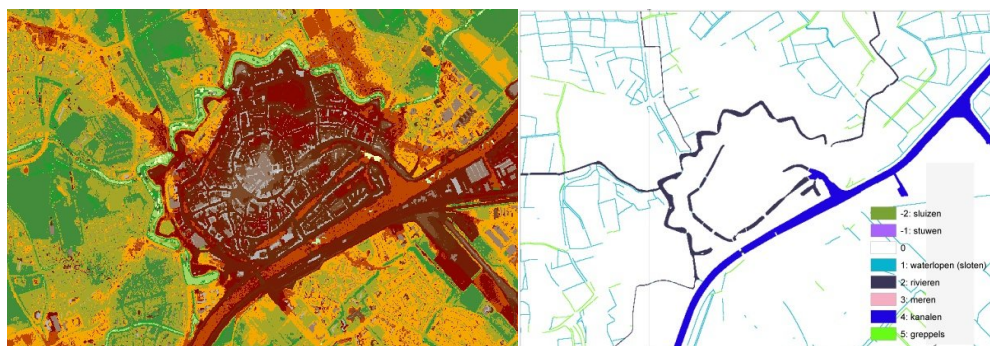
Figuur 3.4: De geologie vertaalt naar het numerieke model.

### 3.6 Hydrologie: bepaling van het AHN

#### 3.6.1 Introductie

De hoogte van het maaiveld fungeert als referentie voor de oppervlaktewaterpeilen en andere hoogtegegevens, zoals bodemhoogte en buisdrainageniveau, het is dus een belangrijke variabele in het model. De maaiveldhoogte is afgeleid uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Dit bestand is gefilterd om de afwijkende hoogten veroorzaakt door gebouwen, begroeiing e.d. te verwijderen. Bij deze filtering is informatie uit het TOP10-vector bestand gebruikt voor het toevoegen van de ligging van het oppervlaktewater.

Het AHN is een digitaal raster dat de maaiveldhoogte representeert. Dit bestand is verkregen door middel van "laser-altimetrie" vanuit een vliegtuig waardoor voornamelijk bebouwing onterecht als maaiveld is gemarkeerd. Dit geldt ook voor de waterpeilen in de kleinere wateren (sloten en kreken). Het hieronder beschreven AHN-filter maakt op basis van het originele AHN bestand (resolutie van 5x5 meter) een hydrologisch maaiveld waarbij huizen, sloten en kanalen (de menselijke ingrepen) zijn verdwenen. Overigens is het AHN bestand niet volledig vlakdekkend en bevat het gebieden waar geen maaiveld hoogte bepaald is, zoals de grote wateren. Naast het AHN bestand wordt ook het TOP10-vector bestand gebruikt. Dit vectorbestand is vertaald naar een grid bestand (5x5 meter) dat alleen de watervoerende elementen beschrijft. Hierin zijn 4 groepen onderscheiden: greppels/sloten, rivieren/kanalen, meren en 'buiten beschouwing gelaten gebied'.



Figuur 3.5: a. AHN presentatie van een gebied nabij Middelburg; b. TOP10-vector nabij Middelburg.

### 3.6.2 Stappen in de AHN-Filtering

Het AHN filter bestaat uit een Fortran programma dat op basis van het AHN grid en het TOP10-vector grid een hydrologisch maaiveld (HSURF) en een waterpeil voor sloten en meren (HWL) berekent. Dit filter bestaat uit een aantal stappen en gedefinieerde criteria die hieronder vereenvoudigd worden beschreven.

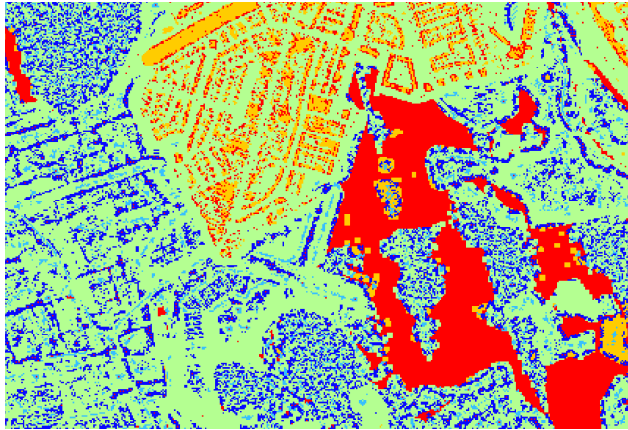
#### Stap 1: Inlezen

Aangezien de afmetingen van het AHN en TOP10-vector grid te groot is om in 1 keer te filteren wordt de filtering in overlappende 'banden' uitgevoerd. Hierbij wordt telkens een band van 3,000 rijen (dit is gelijk aan  $3,000 \times 5$  m) uit de basis bestanden gelezen. Hierbij wordt telkens rekening gehouden met een overlap van 500 rijen (dit is gelijk aan  $500 \times 5$  m).

#### Stap 2: Traceren (1) - maaiveld

In deze stap karakteriseren we de gebieden die 'vlak' zijn en gebieden die uit het maaiveld 'steken'. We definiëren 'vlak' als twee naastliggende modelcellen in het AHN bestand minder dan 50 cm in hoogte verschillen. Tevens wordt de gradiënt met 32 buurcellen gerangschikt van klein naar groot. Als hierdoor een regressielijn met een fit van tenminste 95% kan worden getrokken dan wordt de cel ook beschouwd als maaiveld omdat er dan geen abrupte sprong (bijvoorbeeld een gebouw) in zit. Daarnaast evalueren we of dit 'vlakke' gebied als een lokale depressie of verhoging kan worden gezien. Hiervoor beschouwen we een gebied van 2500 m<sup>2</sup> (10 rijen x 10 kolommen) rondom de huidige locatie en evalueren of het maaiveld op deze locatie minder is dan 25 percentiel (depressie) of meer is dan 50 percentiel (verhoging). Mocht het totale 'vlakke' gebied meer dan 10,000 cellen beslaan dan kennen we dit gebied toe als maaiveld. Mocht het een kleiner gebied betreffen dan merken we het gebied aan als 'potentieel' maaiveld dat in een later stadium (Stap 5) nog maaiveld kan worden. Dit betreffend bijvoorbeeld platte daken van huizen en gebouwen en/of kleine percelen omgeven door sloten.





*Figuur 3.6: Bepaling van gebieden die maaiveld (groen), potentieel maaiveld (oranje), lokale depressies (blauw) en verhogingen (licht blauw) en overig (rood) representeren na Stap Traceren (1) (voorbeeld betreft een gebied buiten Zeeland).*

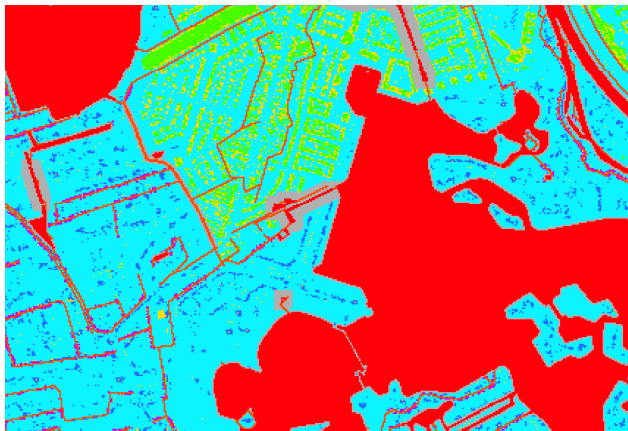
### **Stap 3: Traceren (2) - meren**

Bij de bepaling van de peilen in meren wordt uitgegaan van het TOP10-vector grid bestand. Voor meren wordt het uiteindelijke peil gelijk aan het 5 percentiel waarde gemeten over de gehele verbreiding van het betreffende meer. Deze peilen komen in het grid bestand HWL.

### **Stap 4: Traceren (3) - sloten en greppels, rivieren en kanalen**

De volgende stap is het toevoegen van peilen van sloten/greppels en rivieren/kanalen. De waterlopen in het TOP10-vector gridbestand zijn uiteindelijk bepalend. Eerst wordt voor de sloten en de greppels binnen een straal van 5 buurcellen de mediaan bepaald. Het initiële geschatte water sloot/greppel peil ligt 80 cm beneden de mediaan. Vervolgens wordt binnen een straal van 100 m het diepste punt bepaald. Als dit punt lager is dan het initiële geschatte peil dan vervangt hij deze.

Voor rivieren kanalen wordt geen initiële waarde geschat op basis van de mediaan maar wordt het diepste punt genomen binnen een straal van 1000 m.



*Figuur 3.7: Bepaling van gebieden die maaiveld (licht blauw), potentieel maaiveld (groen), lokale depressies (paars) en verhogingen (blauw), rood (sloten/meren uit TOP10-vector), dijken (grijs) en overig (geel) representeren na **Step Traceren (3)** (voorbeeld betreft een gebied buiten Zeeland).*

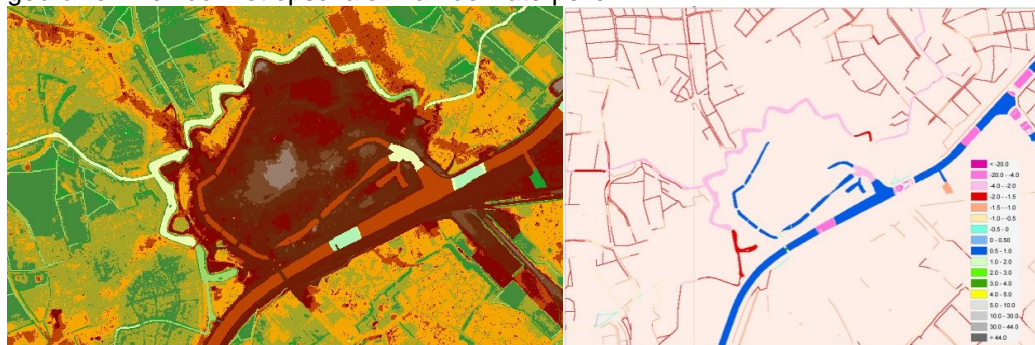


## Stap 5: Interpoleren

Initieel wordt het hydrologische maaiveld (HSURF) gelijk gezet aan het AHN. Voor alle gebieden die niet gemarkeerd zijn door 'maaiveld' wordt HSURF geïnterpoleerd vanuit de randen van het aaneengesloten gebied. Vervolgens worden deze gebieden 'gesmooth' waarbij telkens het gemiddelde van omliggende cellen wordt gebruikt. Dit gaat door tot er in het gehele gebied niet meer dan 10 cellen veranderen. Na deze interpolatie worden voor alle gebieden die 'nog' geen maaiveld zijn gekeken in hoeverre hun waarde in het AHN afwijkt van HSURF. Indien dit minder is dan 0,25 m dan wordt deze gebieden alsnog gekenmerkt als 'maaiveld'. Dit proces gaat net zolang door tot er minder dan 50 veranderingen optreden in HSURF.

## Stap 6: Opschaling Filter

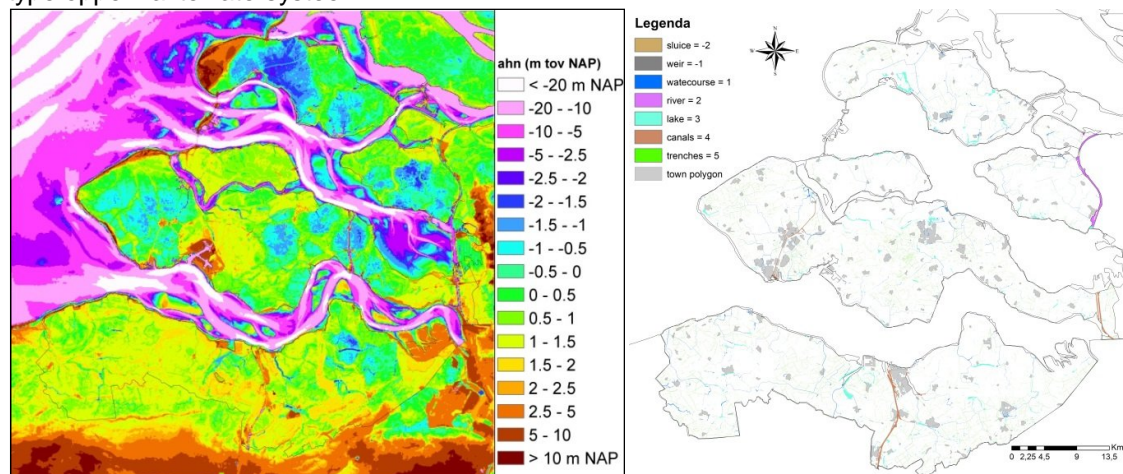
De laatste stap is om HSURF op te schalen naar een andere schaal. Hiervoor gebruiken we de mediaan over alle punten uit HSURF die binnen de opgeschaalde cel vallen. Als we opschalen van 5x5 naar 25x25 betekent dit de mediaan van 25 cellen. Deze zelfde procedure gebruiken we voor het opschalen van de waterpeilen in HWL.



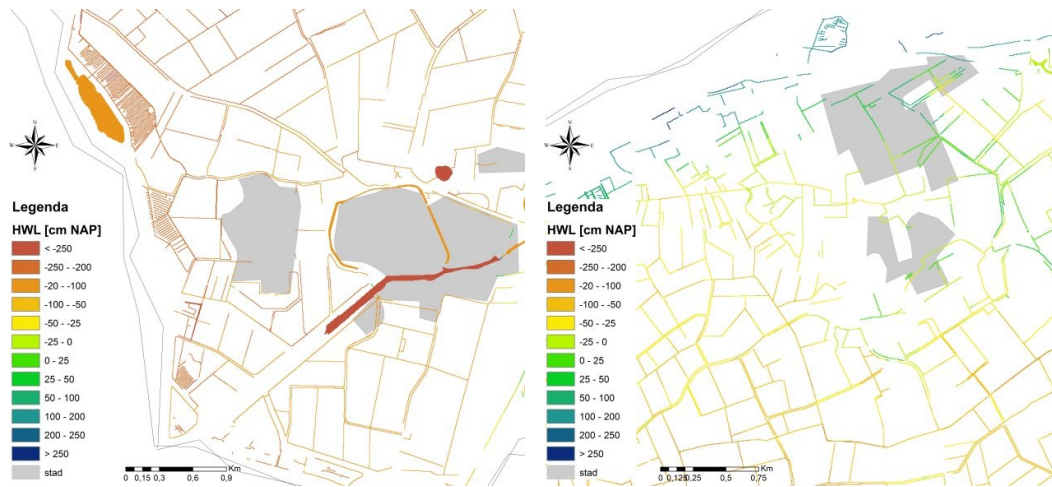
Figuur 3.8: a. HSURF 5x5 presentatie van een gebied nabij Middelburg; b. HWL presentatie van een gebied nabij Middelburg.

### 3.6.3 Hydrologisch maaiveld (HSURF) en waterpeil voor sloten en meren (HWL)

Resultaten van de AHN filtering van geheel Zeeland zijn te zien in Figuur 3.9: HSURF en het type oppervlaktewatersysteem



Figuur 3.9 a. Hydrologisch maaiveld van geheel Zeeland (HSURF) en b. type oppervlaktewater.



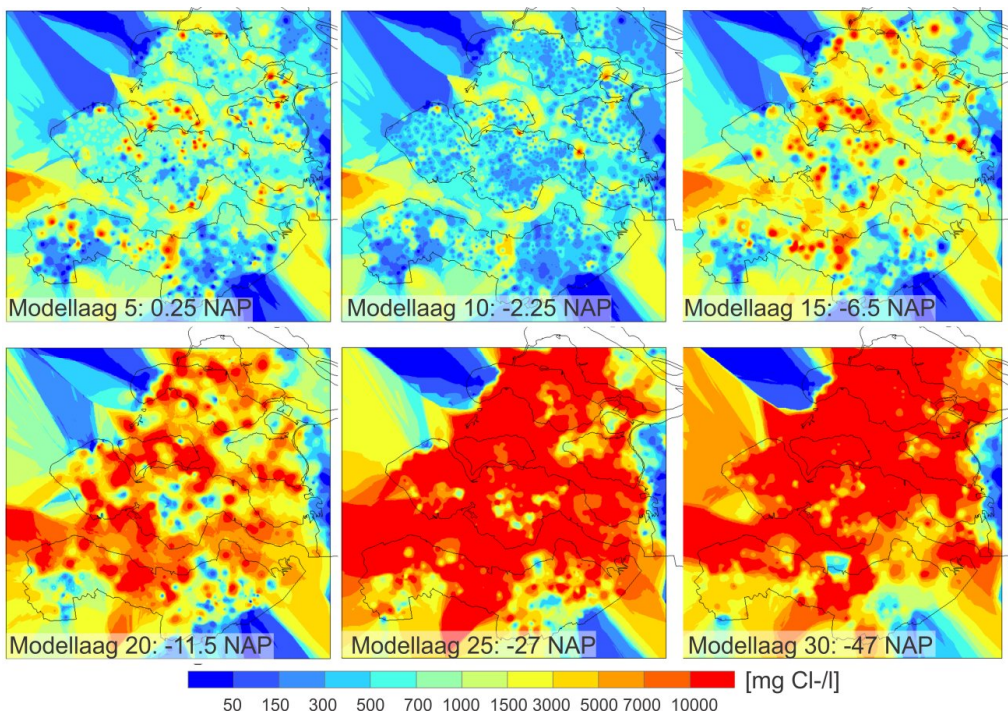
*Figuur 3.10 a. Waterpeil (in cm NAP) voor de waterloop typen 1 'sloot' en 3 'meer' (HWL), zie paragraaf 3.9.1) in twee deelgebieden: Zierikzee en Oostkapelle, Zeeland. Deze twee watertypen duiden niet alle oppervlaktewatersystemen in deze twee deelgebieden. Zo wordt het waterpeil in de Oosterschelde weergegeven door waterloop type 6 'zee of binnenwater'. Op lokaal niveau kunnen waterpeilen afwijken; men dient in het achterhoofd te houden dat het Zeeland model een regionaal modelinstrumentarium is.*

### 3.7 Chloride concentratie verdeling in het grondwater

De 3D chloride concentratie verdeling van het grondwater van het jaar 2010 (in deze rapportage gekenschetst als 'de huidige situatie') is bepaald aan de hand van een drietal stappen. Ten tijde van de constructie van de 3D chloride concentratie verdeling en aansluitend het draaien van de numerieke modellen was de zoet-brak-zout verdeling van het onderzoeksprogramma FRESHM nog niet beschikbaar (zie Bijlage 8B, pagina 84).

De stappen zijn:

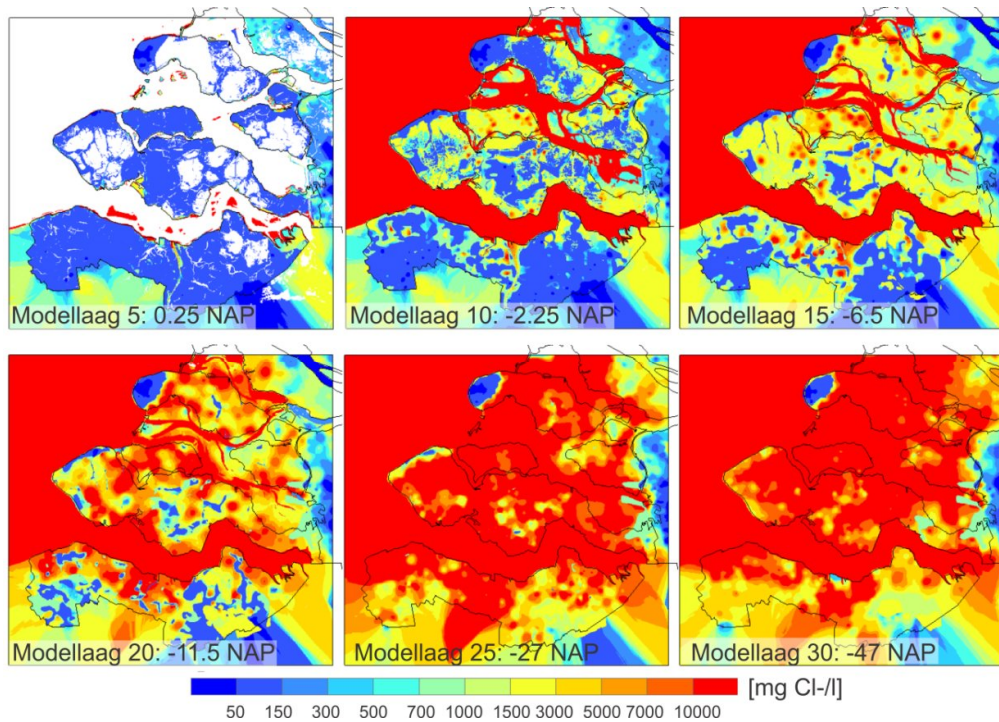
1. Creëren van een ruimtelijke verdeling van alle beschikbare chloride concentratie metingen in het modelgebied door middel van inter- en extrapolatie. In Pebesma (2009) is de gebruikte methodiek uitgelegd. Figuur 3.11 toont het resultaat op een zestal niveaus in de ondergrond. Het aldus verkregen resultaat is niet goed genoeg. Daar waar geen metingen beschikbaar zijn (in het bijzonder buitengaats) worden 'kriging' verdelingen genereerd die niet zijn terug te voeren tot de fysische werkelijkheid. Verder zijn de vele puntmetingen terug te zien in de vorm van een zoet-zout 'kraterlandschap'. Additionele expert-kennis van specifieke grondwatersystemen zoals zoetwaterlenzen onder kreekruggen was nodig voor de volgende verbeterslag.
2. Toevoegen van 2D zoet-brak (150 mg Cl<sup>-</sup>/l) en brak-zout (1000 mg Cl<sup>-</sup>/l) grensvlakken uit de TNO-studie zoet-zout REGIS (Goes et al., 2009; Goes and Vernes, 2010). In deze analyses zijn naast chloride concentratie metingen ook VES en boorgatmetingen meegenomen. Deze grensvlakken –waaraan binnen zoet-zout REGIS een aantal jaren is gewerkt– zijn meegenomen in deze bepaling omdat deze informatie als betrouwbaarder wordt verondersteld dan de ruimtelijke inter- en extrapolatie van chloride concentratie metingen uit stap 1. Nog steeds wordt met deze toevoeging het grote zoute s Noordzee en Wester- en Oosterschelde niet meegenomen. In deze stap 2 wordt in dit buitenwater daarom zoute chloride concentraties gelijk aan het Noordzee water opgelegd (Figuur 3.12 en Figuur 3.13);



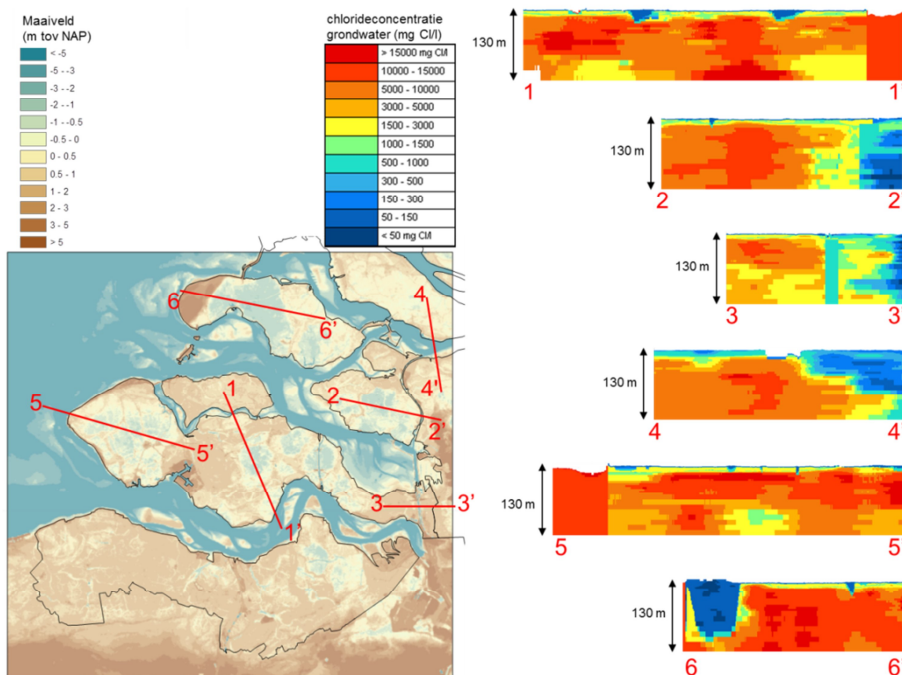
*Figuur 3.11: Chloride concentratie op een zestal niveaus. Deze stap 1 bestaat uit de inter- en extrapolatie van de metingen van de chloride concentratie van het grondwater.*

Het aldus verkregen resultaat is anders: de zoetwaterlenzen onder kreekruggen zijn herkenbaar en het zoute Noordzee water is terug te vinden in de offshore zoet-brak-zout verdeling. Echter, fouten in de bepaling van de chloride concentratie worden gemakkelijk geïntroduceerd, zeker op grotere diepten waar het aantal waarnemingen over het algemeen beperkt is. Slechts een klein deel van de metingen ligt dieper dan -40 m N.A.P (Figuur 2.4). Zo kunnen (numerieke) inversies van zout en zout grondwater gemakkelijk ingevoerd worden, terwijl die in werkelijkheid niet bestaan. Tevens beïnvloedt een onjuiste inversie direct de grondwaterstroming (aangezien de chloride concentraties en grondwaterstroming via de dichtheid aan elkaar gekoppeld zijn). In eerste instantie lijkt het gegenereerde dichtheidsveld visueel misschien wel in orde; tijdens analyse van de resultaten (en dan met name de grondwatersnelheden) vallen de onjuiste inversies direct op. Zulke fouten uit zich bijvoorbeeld in zones van het grondwatersysteem waar de grondwatersnelheid in verticale richting onrealistisch sterk fluctueert, doordat een verkeerde chloride concentratie uit de 3D-interpolatie van de metingen is ingevoerd in het numerieke model. Deze kunstmatige grondwaterstromingen kunnen dominant zijn en de werkelijke grondwaterstroming overtreffen.



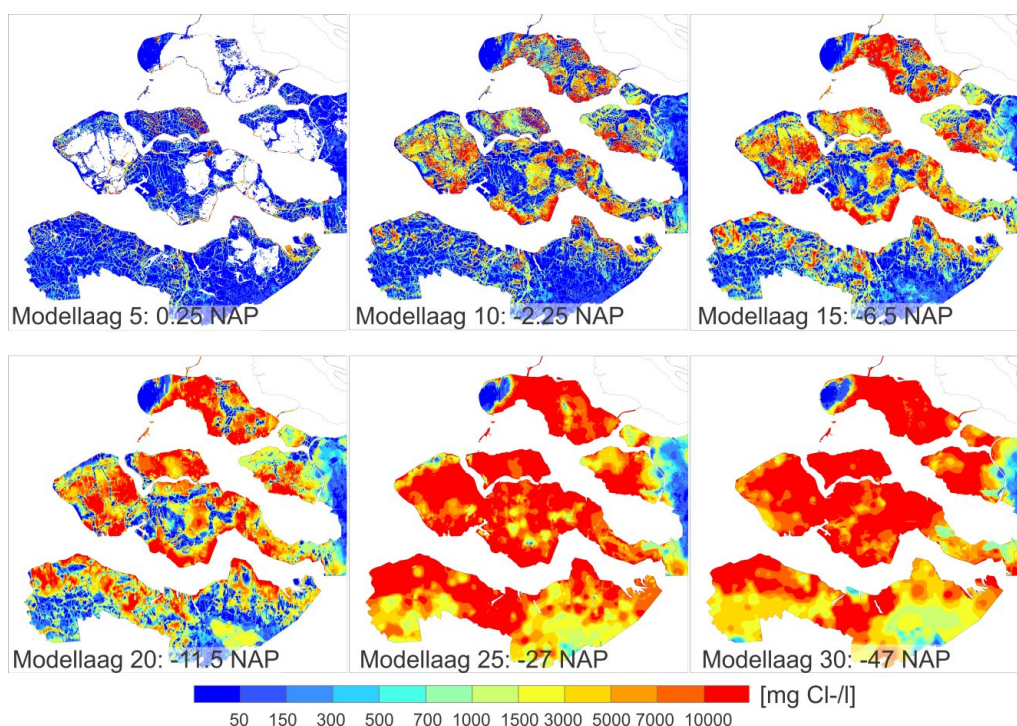


Figuur 3.12: Chloride concentratie op een zestal niveaus na stap 2: implementatie van zout buitenwater over meerdere modellagen en de twee grensvlakken zoet-brak (150 mg Cl/l) en brak-zout (1000 mg Cl/l). T.o.v. stap 1 is zoet grondwater in duingebieden (bijv. de Kop van Schouwen) en de kreekruigen duidelijk zichtbaar.



Figuur 3.13: Doorsnederesultaten van stap 2 (toevoeging scherpe zoet-brak en brak-zout grensvlakken en chloride concentratie groot oppervlaktewater). Duidelijk zijn in de profielen 1 en 5 harde zoute overgangen naar het buitenwater te zien.

3. Verwijderen van numerieke instabiliteiten met behulp van het numerieke grondwaterstromingsmodel. Eerst worden de grootste numerieke inversies in de dichtheidsverdeling lokaal gladgestreken door gedurende een korte tijd het grondwatersysteem door te rekenen en daarbij een grote (onrealistische) moleculaire diffusie te hanteren. Aansluitend is het numerieke grondwater model als interpolator gebruikt door gedurende 40 simulatiejaren (met een normale moleculaire diffusie) de 3D chloride concentratie verdeling te verbeteren. Dit is wel meer dan de tijdsduur tussen het gemiddelde moment van de chloride concentratie meting, zijnde 1990 (Figuur 2.4a), en 2010, de start van de scenario simulaties. Het eindresultaat na verwijdering instabiliteiten is terug te vinden in Figuur 3.14. In deze simulatieduur hebben tevens de dunne regenwaterlenzen zich kunnen ontwikkelen.



Figuur 3.14: Chloride concentratie op een zestal niveaus na stap 3: Het numerieke grondwater model als interpolator laat de zoetwatervoorraden onder kreekruigen explicieter tevoorschijn komen tot en met modellaag 20 (-11.5 m NAP). Buitenwater concentraties zijn hier niet afgedrukt.

Het eindresultaat is een 3D chloride concentratie verdeling in het gehele numerieke model. Na deze drie stappen zijn de volgende zoete grondwaterlichamen beter te onderscheiden:

- in de ondiepe delen zijn dunne zoete regenwaterlenzen traceerbaar terwijl de zoutconcentratie ter plaatse door opwaartse kwel met de diepte snel toeneemt.
- brak tot zout grondwater is aanwezig in de diepe poldersystemen; met name te Schouwen-Duiveland zijn grote gebieden al heel erg zout, vanaf zo'n -6.5 m NAP.
- kreekruigen met zoet grondwater reiken tot in elk geval -11.5 m NAP.
- op de grotere diepten van Zeeuws-Vlaanderen zijn zout-zoet grondwater inversies traceerbaar.

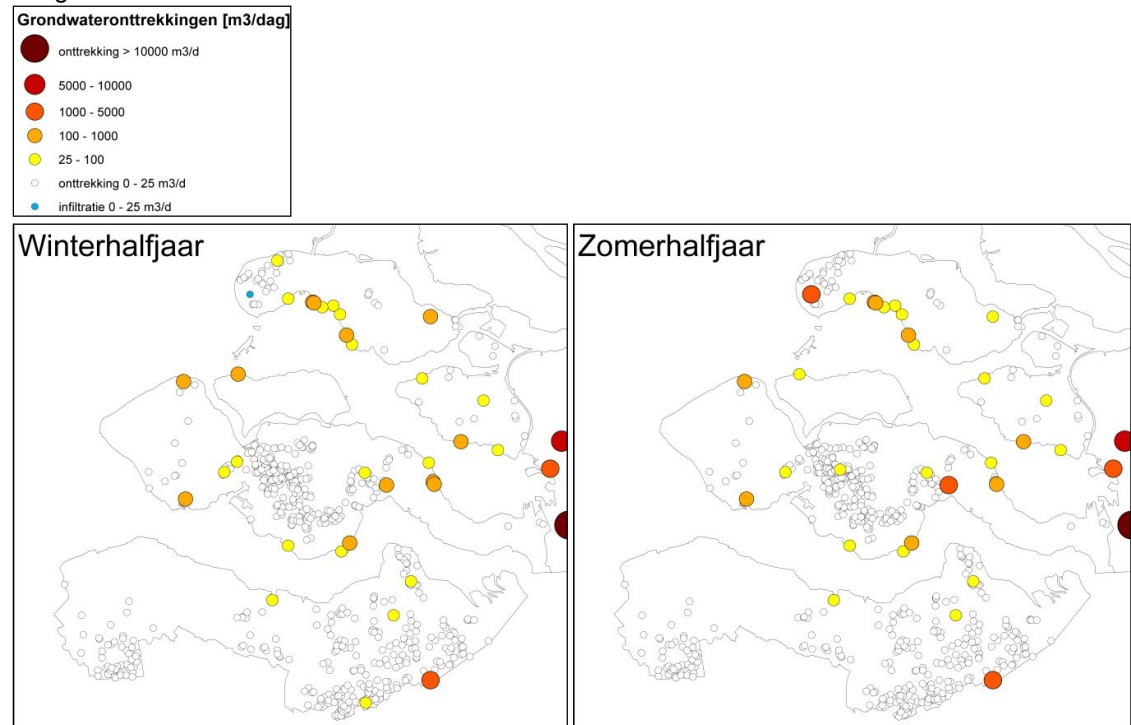
Verder zijn in zowel Brabant als op de Kop van Schouwen de diepe zoetwaterlenzen goed zichtbaar, maar deze zoete grondwatervoorraden waren al vanaf de eerste stap in deze procedure identificeerbaar.

### 3.8 Onttrekkingen

De locatie en het debiet van de grondwateronttrekkingen is bepaald op basis van een provinciaal bestand overeenkomend met het Landelijk Grondwater Register (LGR)<sup>6</sup>. In Figuur 3.15 is het onttrekkingsdebiet voor de zomer en de winter weergegeven van alle onttrekkingen. Voor de plaatsing van de grondwateronttrekkingen in het numerieke model zijn de volgende regels gebruikt:

1. Als bovenkant onttrekking in watervoerend pakket ligt, dan wordt debiet van deze onttrekking over het gehele watervoerende pakket verspreid.
2. Als bovenkant onttrekking in weerstandslaag ligt, dan wordt debiet van deze onttrekking over het onderliggende watervoerende pakket verspreid.
3. Als bovenkant onttrekking in onderste weerstandslaag van het model ligt en tegelijk boven de onderkant van het modeldomein op -137m NAP, dan wordt debiet van deze onttrekking over het bovenliggende watervoerende pakket verspreid.
4. Als bovenkant onttrekking onder de onderste modellaag ligt, dan ligt deze onttrekking buiten het modelgebied en is niet verwerkt in het model.

De werkelijke configuratie van drinkwaterwinningen is in de praktijk complexer en vergt eigenlijk een fijnere modellerschaal van 100\*100 m<sup>2</sup> om deze configuratie accuraat te schematiseren. Voor deze regionale modellering is echter volstaan met een enkelvoudige bron per drinkwaterwinning, eventueel verspreid over meerdere modellagen in het verticaal. Bij de twee Zeeuwse drinkwaterwinningen is sprake van infiltratie en onttrekking. Daar is de netto onttrekking aangehouden.



Figuur 3.15: Stap grondwateronttrekkingen volgens het provinciaal bestand/LGR datum 1995-2002.

<sup>6</sup> Het Provinciale Grondwater Register met data van de jaren 1995-2002 is gebruikt.



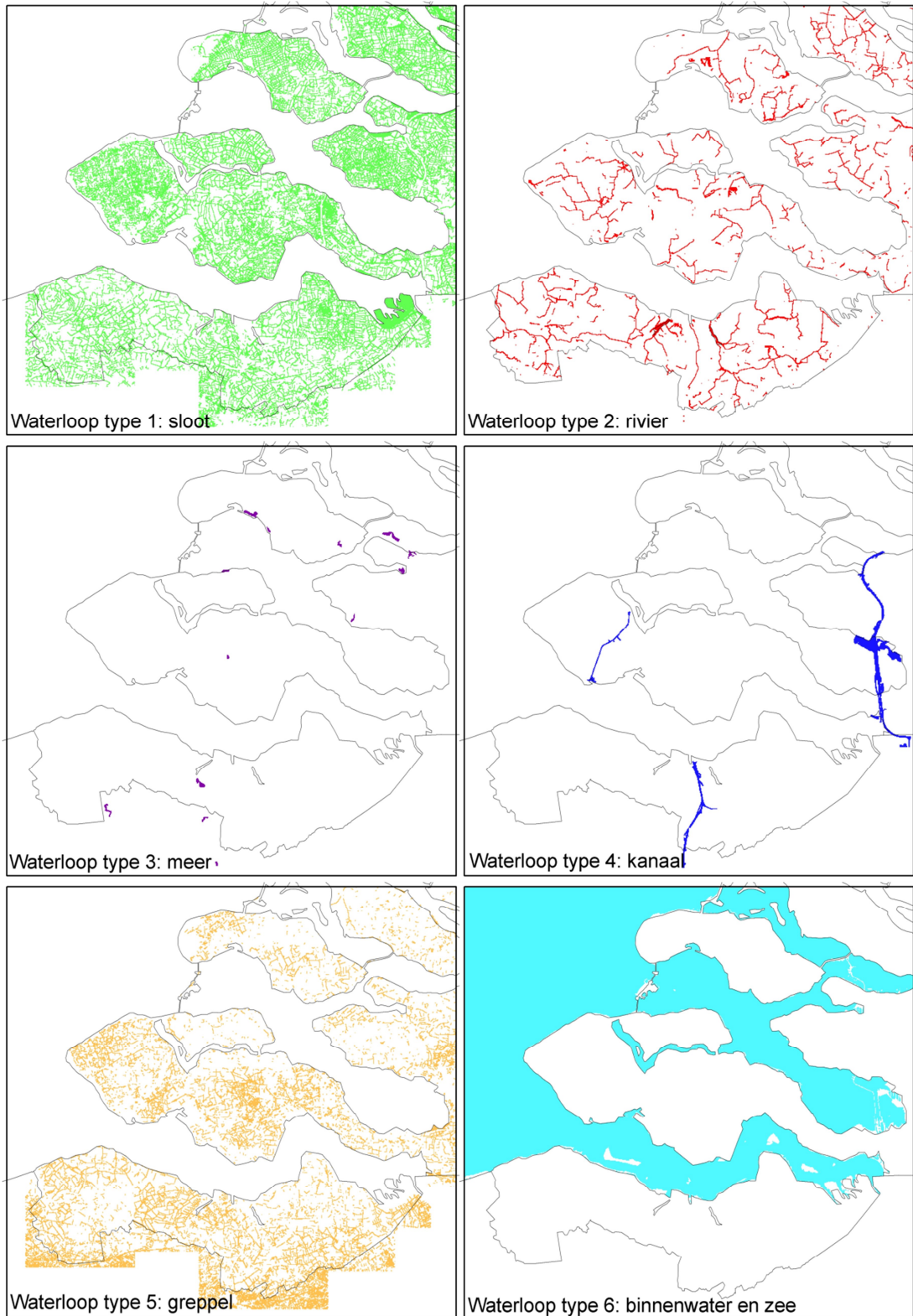
### 3.9 Oppervlaktewatersysteem

#### 3.9.1 Ligging waterlopen

Het oppervlaktewatersysteem is op basis van de mate van interactie met het grondwatersysteem onderverdeeld in 6 typen (Figuur 3.16). Elk type heeft een andere interactie met het grondwatersysteem, en dit is te kwantificeren met een weerstandsterm, binnen de MODFLOW modellering ook wel 'conductance' genoemd. De typen zijn:

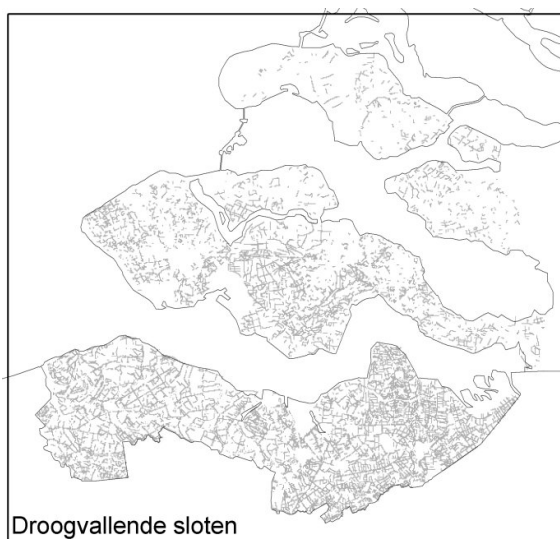
- 1 Sloot, inclusief droogvallende sloten
- 2 Rivier
- 3 Meer
- 4 Kanaal
- 5 Greppel
- 6 Zee of binnenwater.
- 7 Bij het Waterschap Scheldestromen wordt de indeling primaire, secundaire en tertiaire waterlopen gehanteerd. De ligging van de waterlopen komt overeen met het in deze studie gebruikte TOP10-vector bestand. De primaire waterlopen komen overeen met gedeeltelijk type 1 (sloot) en type 2 (rivier), de secundaire waterlopen zijn gedeeltelijk gelijk aan type 1 (sloot) en type 5 (greppel) en de tertiaire waterlopen zijn gelijk aan een deel van type 5 (greppel).

Kreken en watergangen vallen onder het type 'rivier'. Het type waterloop 'meer' is niet meegenomen in het grondwater model. Het beperkt aantal als 'meer' gecategoriseerde wateren (Figuur 3.16c) zijn klein en hebben geen significantie hydrogeologische invloed op het grondwater. Het Veerse Meer, Grevelingenmeer en het Volkerrak-Zoommeer worden als 'binnenwater' gecategoriseerd. Het meer midden in Zeeuwsch-Vlaanderen is een spaarbekken met een bodemafsluiting. Het meer boven St Philipsland middenin het Grevelingenmeer zijn de spaarbekkens ten behoeve van de zoet-zout scheiding bij de scheepvaartsluizen.



Figuur 3.16: ligging waterloop typen 1 t/m 6.

Voor de toekenning van de waterlopen aan de modelcellen is de volgende regel gebruikt: in 1 cel kunnen meerdere van de typen waterlopen 1 t/m 5 liggen. Echter, indien waterloop type 6 in een cel ligt kunnen er geen andere waterlopen liggen. Voor de gebieden in België zonder informatie over waterlopen is in elke modelcel een waterloop type 1 gelegd. Dit houdt in dat ook in het Vlaamse deel van het model grondwater in verbinding staat met het oppervlaktewatersysteem. Voor waterloop typen 1 en 5 is tevens rekening gehouden met droogvallende sloten (Figuur 3.17). Indien een modelcel een droogvallende sloot bevat, valt deze waterloop weg in het zomerscenario.



Figuur 3.17: droogvallende sloten (bron: Waterschap Scheldestromen).

### 3.9.2 Waterpeilen

Hieronder wordt de volgorde van het plaatsen van de waterpeilen voor waterloop typen 1 (sloot) en 2 (rivier) in het grondwater model opgesomd:

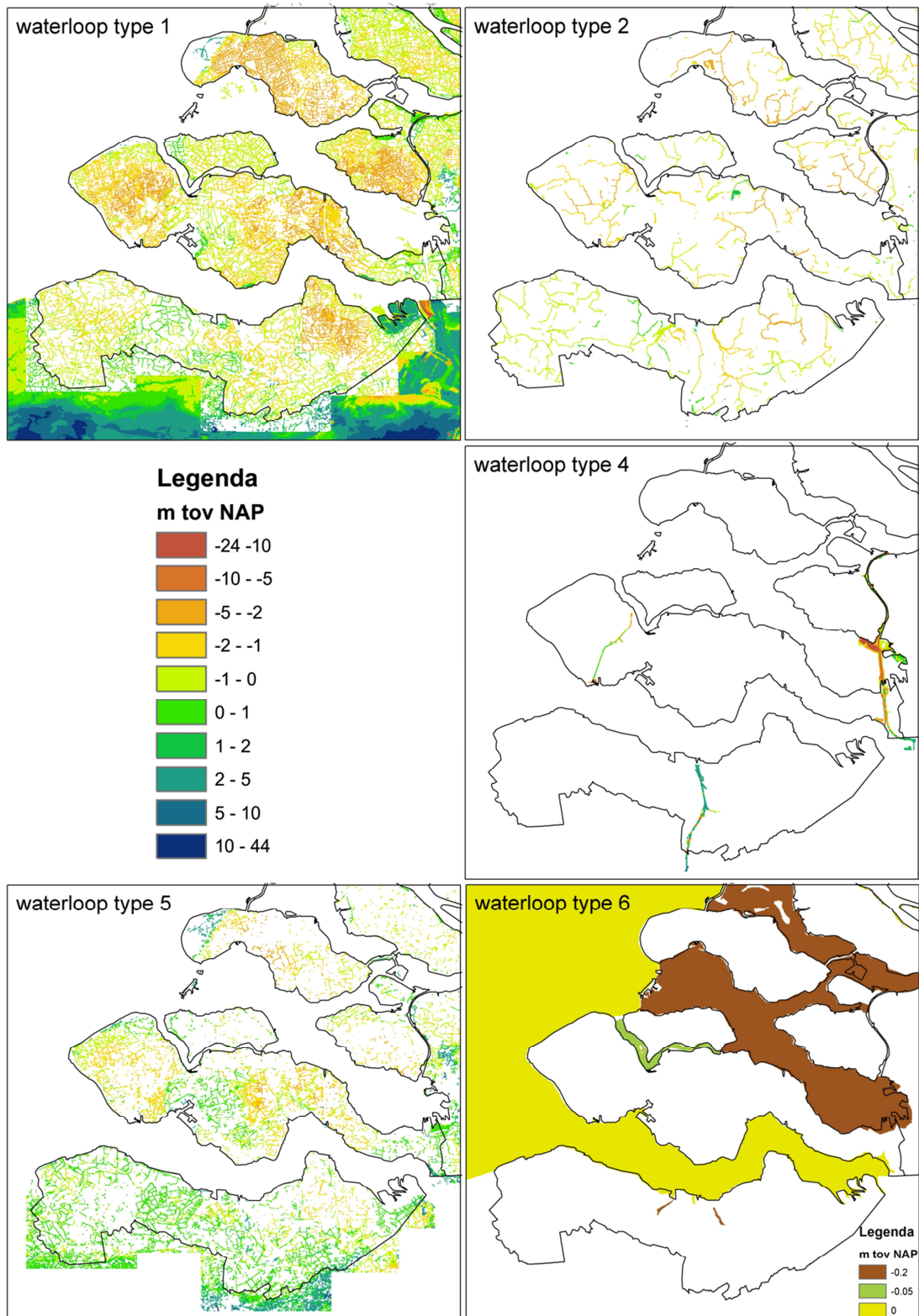
1. eerst de gehandhaafde waterpeilen volgens Waterschap Scheldestromen,
2. dan het peilvakkenbestand 2005 (bron: Waterschap Scheldestromen),
3. dan HWL (waterpeilen bepaald met behulp van het maaiveld, zie paragraaf 3.6.3),
4. voor België waar HWL niet bekend is, is gebruik gemaakt van de karakteristieken van waterlopen in Zeeuws-Vlaanderen (een enigszins vergelijkbaar gebied):  $\text{waterpeil} = \text{AHN} - 1.50 \text{ m}$ , waarbij 1.50 m het gemiddelde verschil is tussen maaiveld en waterpeil van waterloop type 1 in Zeeuws-Vlaanderen.

Waterloop type 4 (kanaal) heeft waterpeil = 0 m en diepte = 6 m. Voor waterloop type 5 (greppel) is het waterpeil gelijk aan HWL (peilenbestand gebaseerd op het maaiveld).

Voor de grote binnenwateren (type 6) zijn de volgende waarden gebruikt (anno 2010):

- Veerse Meer: zomerpeil = -0.05 m NAP, winterpeil = -0.6 m NAP
- Grevelingen: waterpeil = -0.2 m NAP
- Oosterschelde: waterpeil = -0.2 m NAP
- Zee en Westerschelde: 0 m NAP
- Volkerak-Zoommeer: waterpeil = -0.2 m NAP

Het zomerpeil per type waterloop, zoals ingevoerd in het grondwater model, is weergegeven in Figuur 3.18.



Figuur 3.18: zomerpeilen per type waterloop (inclusief drogvallende sloten waarbij waterpeil=bodem).

### 3.9.3 Conductance waterlopen

De zogenaamde 'conductance' is een typische MODFLOW term waarmee de interactie tussen het oppervlaktewater en het grondwatersysteem wordt geregeld (Harbaugh and McDonald, 1988). Het representeert een weerstand tegen grondwaterstroming van en naar het oppervlaktewater; hoe groter de *conductance*, hoe groter de interactie. In theorie dien je bij grote modelcellen nog een extra weerstand in te bouwen (Pauw et al., 2014), maar deze kennis is pas na de constructie van het basismodel en het draaien van de scenario's vrijgekomen. De *conductance* van een waterloop van de typen 1 t/m 5 wordt bepaald door:

$$\text{Conductance} = \text{nat oppervlak waterloop} / \text{weerstand} \quad (1)$$

$$\text{Nat oppervlak} = \text{lengte} * \text{breedte} + 2 * \text{lengte} * \text{diepte (type 1 t/m 5)} \quad (2)$$

Het natte oppervlak per modelcel is meestal wel redelijk goed te bepalen, de weerstand daarentegen moeilijk; modelleerervaring moet eraan te pas komen om deze waarde te schatten. Type 6 loopt meestal door in de buurcellen en bedekt de gehele modelcel, dus hiervoor geldt:

$$\text{Nat oppervlak} = \text{lengte} * \text{breedte (type 6)} \quad (3)$$

De *conductance* wordt verdeeld over de modellagen waar de waterloop in ligt waarbij rekening wordt gehouden met de dikte van de modellaag.

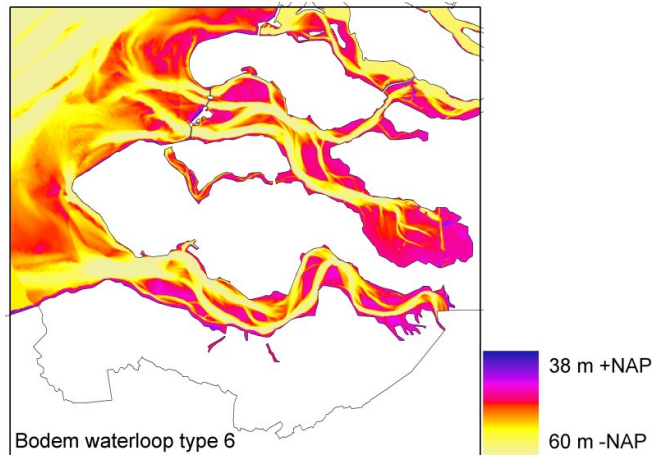
Het basisbestand met de ligging van de waterlooptypen 1 t/m 5 heeft een resolutie van 5x5 m<sup>2</sup>. Voor de waterloop typen 1 en 5 wordt de lengte van de waterloop binnen een modelcel van 100x100 m<sup>2</sup> bepaald door het aantal 5x5 m<sup>2</sup> cellen binnen de 100x100 cel m<sup>2</sup> te bepalen met deze waterloopcode en dan te vermenigvuldigen met 5 meter (lengte cel van het basisbestand).

Bij waterloop typen 2 en 4 wordt de volgende rekenregel gebruikt: bij minder dan 20 5x5 m<sup>2</sup> cellen met waterloop binnen een 100x100 m<sup>2</sup> cel is de rivier of het kanaal slechts 5 meter breed en wordt de lengte berekend. Bij meer dan 20 cellen is er slechts 1 rivier/kanaal en loopt deze over een lengte van 100 meter door de cel, de breedte wordt dan dus berekend.

De breedte en de diepte van de waterlopen zijn als volgt geschat (diepte type 1 en 5 is op basis van waarden in MIPWA bepaald, Snepvangers and Berendrecht (2007)):

Tabel 3.2 Breedte en diepte waterlopen

Type	Breedte (m)	Diepte (m)
1	3	0.5
2	5 m of wordt berekend	2
4	5 m of wordt berekend	Schelde-Rijnkanaal: 6 Kanaal Walcheren: 5 Kanaal Gent-Terneuzen: 12.5
5	2	0.2 (indien droogvallende sloot: 0)
6	100	mbv HSURF, zie paragraaf 3.6.3



Figuur 3.19: bodem waterloop type 6.

De gemiddelde *conductance* en diepte in die delen van België, waar geen informatie over bekend is, worden bepaald op basis van de gemiddelde waarde van waterloop type 1 in Zeeuws-Vlaanderen.

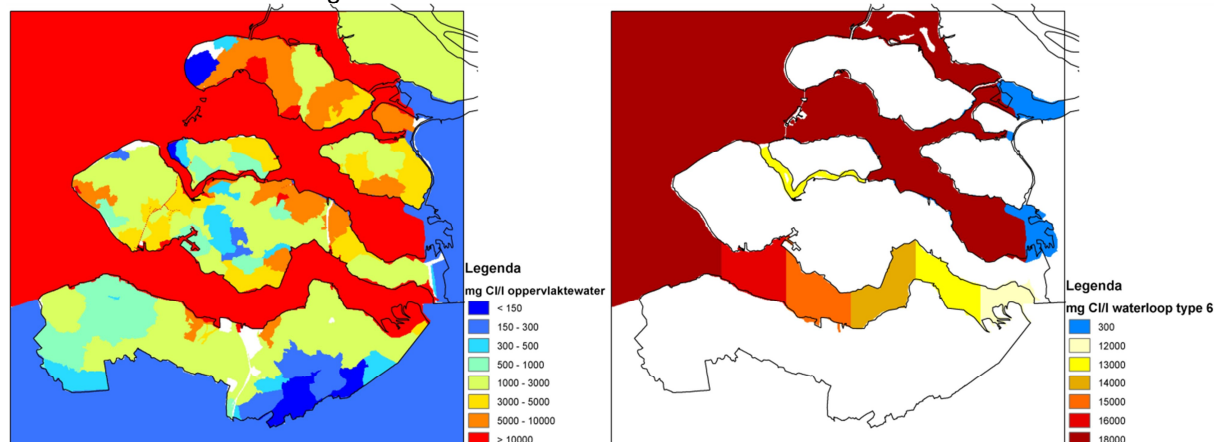
#### 3.9.4 Chloride concentratie oppervlakte waterlopen

Waterloop typen 1 t/m 5:

1. België: 200 mg Cl<sup>-</sup>/l
2. Noord-Brabant: 200 mg Cl<sup>-</sup>/l
3. Zuid-Holland: 2000 mg Cl<sup>-</sup>/l (laagste chloride concentratie oppervlaktewater van Schouwen-Duiveland)
4. Zeeland: bestand Waterschap Scheldestromen (Figuur 3.20a)

Voor waterloop type 6 gelden de volgende waarden (Figuur 3.20b):

1. Veerse Meer: 13000 mg Cl<sup>-</sup>/l
2. Grevelingen: 18000 mg Cl<sup>-</sup>/l
3. Oosterschelde: 18000 mg Cl<sup>-</sup>/l (kaart Waterschap Scheldestromen)
4. Volkerak en Zoommeer: 300 mg Cl<sup>-</sup>/l
5. Westerschelde: met verhang van 18000 mg Cl<sup>-</sup>/l naar 12000 mg Cl<sup>-</sup>/l
6. Noordzee: 18000 mg Cl<sup>-</sup>/l



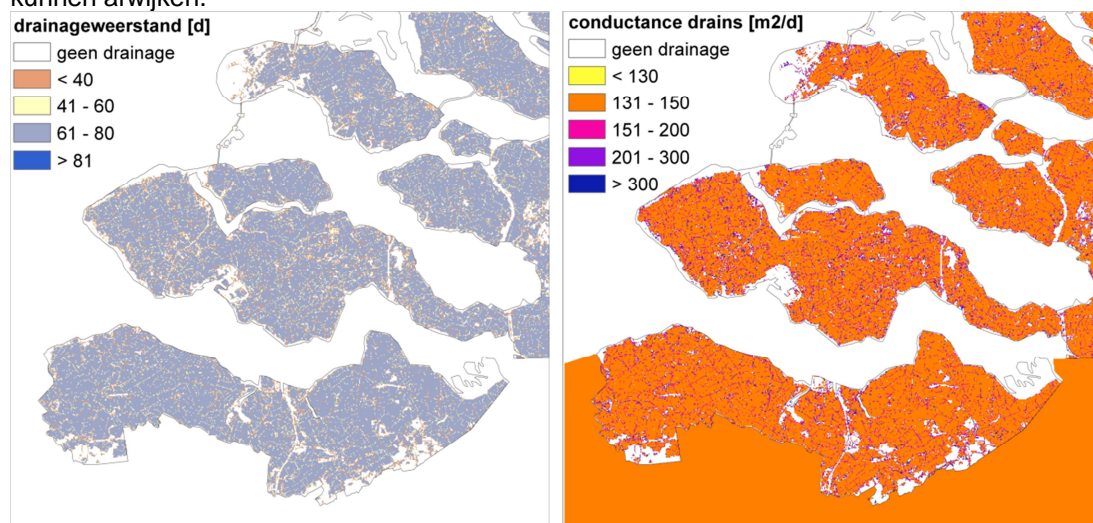
Figuur 3.20: chloride concentratie oppervlaktewater a. alle waterlopen en b. waterlooptype 6 met verhang in de Westerschelde. Bron: Waterschap Scheldestromen).



### 3.10 Drainage

Alterra (Massop, 2002) heeft een kaart gemaakt voor heel Nederland met de diepte en *conductance* van de drains. Deze kaart heeft een resolutie van 25x25 m<sup>2</sup> en is opgeschaald naar 100x100 m<sup>2</sup> waarbij de *conductance* van de 16 25\*25 m<sup>2</sup> cellen die in een 100\*100 m<sup>2</sup> cel liggen gesommeerd is. Er zijn gebieden geïnventariseerde waarvoor de buisdrainage gebiedsdekkend is. Voor deze gebieden zijn vervolgens relaties gelegd tussen aanwezigheid van buisdrainage en karteerbare kenmerken zoals landgebruik, bodem en grondwatertrap. De gevonden relaties zijn gebruikt om een landsdekkende kaart met buisdrainage te maken. De kaart is vervolgens voorgelegd aan de waterschappen in Noord-Nederland (Snepvangers and Berendrecht, 2007) en dit heeft tot een aantal aanpassingen geleid. Tevens is informatie van drainagebedrijven (in Noord-Nederland) verwerkt over welk percentage van het areaal in omschreven delen van het waterschap zijn gedraineerd, wat de bijbehorende draindiepte bedraagt en water de meest toegepast drainafstand is. Zowel de landbouwkundig als niet-landbouwkundig in gebruik zijnde percelen zijn verwerkt in de kaarten.

De buisdrainagekaart is een statistische kaart, d.w.z. dat voor grotere gebieden het areaal buisdrainage ongeveer klopt, echter op perceelniveau zal de waarde op de kaart kunnen afwijken.



Figuur 3.21: a. drainageweerstand en b. conductance drains.

Voor de diepte van de drains wordt de volgende regel gebruikt:

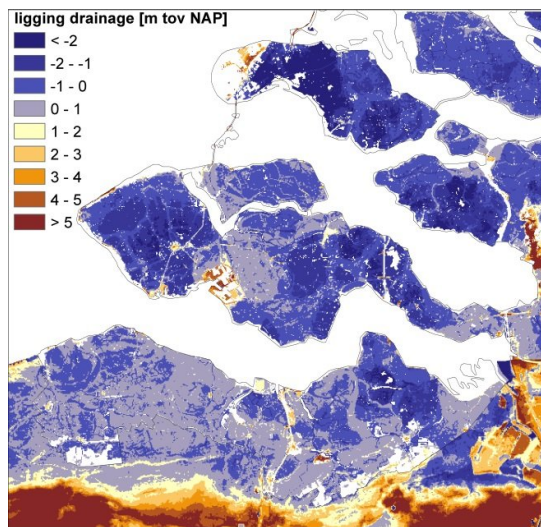
$$\text{'10 cm boven winterpeil met een maximum van -1.1 m -mv'} \tag{4}$$

Indien wel een *conductance* geen winterpeil bekend is worden de volgende regels gebruikt:

- Zuid-Holland: maaiveld – 0.9 m (lage gronden)
- Noord-Brabant: maaiveld – 1.05 (hoge gronden)
- België: in elke cel drains met een gemiddelde *conductance* van Zeeland en diepte van 10 cm boven winterpeil met max van -1.1 m -mv

Tabel 3.3 Draindiepte voor hogere en lagere gebieden.

	hogere gebieden	lagere gebieden
<b>Gemiddelde draindiepte</b>	ca 100 a 110 cm -mv	ca 90 cm -mv
<b>Gemiddelde wintergrondwaterstand</b>	ca 20 cm + draindiepte	ca 15 cm + draindiepte
<b>Gemiddelde zomergrondwaterstand</b>	ca 160 a 180 cm -mv	ca 110 a 130 m -mv



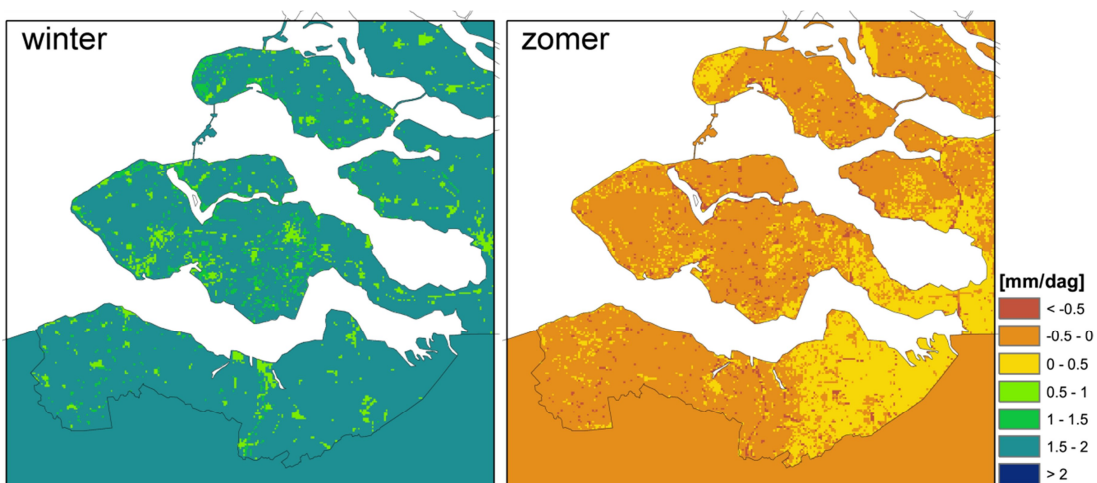
Figuur 3.22: diepte van de drains (m t.o.v. NAP).

### 3.11 Grondwateraanvulling

Grondwateraanvulling is een invoerparameter voor het grondwater model. Het Nationaal Hydrologisch Modelinstrumentarium (NHI) berekent de grondwateraanvulling met behulp van onder andere landgebruik, temperatuur, neerslag en grondwaterstanden (De Lange et al., 2014). In dit Zeeland model is voor de grondwateraanvulling gebruik gemaakt van de berekeningen van het NHI. Voor het zomerhalfjaar (april - september) en voor het winterhalfjaar (oktober-maart) is de gemiddelde waarde genomen van de periode 1990 – 2000.

De NHI data zijn op een paar punten aangepast (resultaten in Figuur 3.23):

1. Neerschaling van 250\*250 m<sup>2</sup> naar 100\*100 m<sup>2</sup>.
2. Toevoegen grondwateraanvulling België: winter = 1.6 mm/dag en zomer -0.05 mm/dag. Deze waarden komen overeen met de gemiddelde waarden van Zeeuws-Vlaanderen.
3. Grondwateraanvulling zomer maximaal 0.5 mm/dag en in de winter maximaal 1.6 mm/dag. Daarnaast is de grondwateraanvulling in de winter 0.8 mm/dag indien het NHI een waarde < 0 aangeeft.
4. Grondwateraanvulling stedelijk gebied = 0.5\*omgevingswaarde. In stedelijk gebied is ongeveer 40% van de verdamping van grasland. De directe omgeving van het stedelijk gebied is echter niet altijd grasland maar bestaat ook af en toe uit bossen of andere landbouwpercelen dan grasland. Deze gebieden hebben een iets lagere verdamping zodat er is gekozen voor 50% van de omgevingsverdamping in plaats van 40%.



Figuur 3.23: grondwateraanvulling a. winter; b. zomer in mm/dag.

## 4 Kalibratie

### 4.1 Inleiding

Bij de bouw van het grondwater model zijn alle parameterwaarden omgeven met onzekerheden. Soms is die onzekerheid klein, bijvoorbeeld als de parameterwaarde direct en met grote nauwkeurigheid in het veld kan worden gemeten. Vaak zijn de onzekerheden echter groot, doordat directe metingen in het veld niet mogelijk zijn, of doordat de parameter sterk in ruimte en/of tijd varieert, waardoor de hoeveelheid informatie die een per definitie eindig aantal metingen kan opleveren het parameterveld slechts in beperkte mate kan vangen.

Indien er voldoende vertrouwen bestaat in de conceptuele juistheid van het grondwater model (even afgezien van de exacte waarden van de parameters), kan dit model zelf meer informatie verschaffen over de parameterwaarden. Dit gebeurt door de uitkomsten van het model of modelvoorspellingen (stijghoogten, fluxen, concentraties etc.) te vergelijken met meetwaarden. Deze vergelijking kan men leidend laten zijn in de aanpassing van de modelparameters: de modelparameters worden dan zodanig aangepast dat de modelvoorspellingen de meetwaarden zo goed mogelijk benaderen. Dit proces heet kalibratie (andere termen zijn ijking en inverse modellering). Het idee is dat indien het model de beschikbare meetwaarden beter reproduceert, het model ook beter presteert op die locaties en die tijden waarvoor geen meetwaarden beschikbaar zijn. De voorwaarde hiervoor is dat het conceptuele model wel voldoende nauwkeurig moet zijn. Ook de metingen moeten uiteraard van voldoende kwaliteit zijn.

### 4.2 Kalibratiedata

#### 4.2.1 Samenstelling van de kalibratieset

Voor de kalibratie van het Zeelandmodel is vooralsnog alleen gebruik gemaakt van stijghoogtedata. Als basis diende de grote set aan langjarige meetreeksen van stijghoogten die beschikbaar zijn vanuit de in Zeeland aanwezige peilbuizen, zoals deze zijn opgenomen in de DINO database. Als startpunt werden die filters geselecteerd waarin metingen zijn gedaan in de periode 1-1-1991 t/m 31-12-2000. In totaal betreft het hier 3037 filters. Deze meetreeksen zijn echter bij lange na niet allemaal geschikt voor gebruik in de kalibratie. De volgende selecties zijn uitgevoerd om een betrouwbare kalibratieset te verkrijgen:

1. Allereerst zijn alle reeksen onderworpen aan een test met een zogenaamd tijdreeksanalysemodel. Hierbij werden 883 meetreeksen uit de kalibratieset verwijderd die niet of niet goed genoeg verklaard konden worden uit de dynamiek van het neerslagoverschot. Dit wordt gedaan omdat de dynamiek van het neerslagoverschot de enige dynamiek<sup>7</sup> in de randvoorwaarden van het model is (met uitzondering van de schakeling tussen winter- en zomerpeilen) die met voldoende nauwkeurigheid bekend is en daardoor ook op een goede manier in het model verwerkt kan worden. Meetreeksen die een dynamiek laten zien die niet toegeschreven kan worden aan de dynamiek van het neerslagoverschot bevatten grote meetfouten of worden beïnvloed door (vaak lokale) gebeurtenissen en processen die niet worden gemodelleerd. Gebruik van deze reeksen in de kalibratie kunnen verstorend werken doordat parameters aangepast worden om de

<sup>7</sup> Variabele grondwateronttrekkingen veroorzaken vanzelfsprekend ook een dynamiek in het grondwater systeem maar de exacte debieten over de tijd zijn niet te bepalen. Het is waarschijnlijk dat een aantal verwijderde meetreeksen die niet goed verklaard kunnen worden gelieerd zijn aan variabele grondwateronttrekkingen.

misfit tussen model en meting te verkleinen, terwijl de misfit niet het gevolg is van suboptimale parameterwaarden maar van meetfouten of (zeer) lokale effecten ter plaatse van de meting.

2. Om uiteindelijk met voldoende betrouwbaarheid een gemiddelde stijghoogte te kunnen extraheren uit de meetreeks voor gebruik in de stationaire kalibratie, zijn vervolgens alle meetreeksen met minder dan 4 metingen in de periode 1-1-1991 t/m 31-12-2000 uit de kalibratieset verwijderd. Het ging hier om 1821 reeksen.
3. Eén reeks is daarna verwijderd omdat deze afkomstig was van een filter waarvan geen filterhoogtes bekend zijn.
4. Vervolgens zijn 8 reeksen verwijderd van buizen die te dicht ( $< 300$  m) in de buurt van grote ( $> 30000$  m<sup>3</sup>/jaar) grondwaterwinningen gelegen zijn. De reden hiervoor is dat de onttrekkingskegel sterk wordt afgevlakt door de ruimtelijke discretisatie van het model.
5. 183 reeksen zijn verwijderd omdat deze afkomstig zijn van filters die ofwel te dicht ( $< 20$  m) bij sloten, ofwel te dicht ( $< 50$  m) bij grotere waterlopen gelegen zijn. Het idee hierachter is dat de stijghoogtes in deze filters te sterk afhangen aan de oppervlaktewaterpeilen, welke niet gekalibreerd worden omdat ze voldoende goed bekend geacht worden. Indien de oppervlaktewaterpeilen inderdaad goed in het model zitten, is de kans groot dat de stijghoogtes in de dichtbijgelegen filters automatisch ook goed gemodelleerd worden. Mochten de waterpeilen toch niet goed in het model zitten, kan dat een misfit opleveren in de nabijgelegen filters. In dat geval is het niet 'eerlijk' deze te compenseren door andere parameters dan de oppervlaktewaterpeilen aan te passen. (Te) dichtbij oppervlaktewater gelegen filters zijn overigens wel opgenomen in de kalibratieset indien de filters van het oppervlaktewatersysteem gescheiden zijn door een scheidende laag.
6. 158 reeksen die op basis van de bovenkant en onderkant van het filter volledig binnen een kleilaag van het ondergrondmodel (REGIS II) vielen, zijn verwijderd. De reden hiervoor is tweeledig. Allereerst is het (met uitzondering van de bovengrond) onwaarschijnlijk dat deze filters zich daadwerkelijk in een kleilaag bevinden, omdat in kleilagen doorgaans geen grondwaterfilters geplaatst worden. Ten tweede kan over een scheidende laag een significant verticaal stijghoogteverval optreden. Het is dan erg belangrijk dat de positie van het filter binnen de kleilaag goed bekend is. Gezien de onzekerheden waarmee de ondergrondkartering omgeven is, is dat niet gegarandeerd.
7. 13 reeksen moesten verwijderd worden doordat het hart van de filters zich onder de onderste actieve modellaag bevonden.

Na deze voorselectie bleven 606 meetreeksen over die als basis zijn gebruikt voor de kalibratie. In een later stadium zijn hiervan nog een aantal meetreeksen afgevallen (zie hieronder, paragraaf 4.2.4). De resterende hoeveelheid en ruimtelijke spreiding zijn als voldoende beoordeeld.

#### 4.2.2 Toekenning van de meetreeksen aan het modelgrid.

Van elke van de 606 filters is de XY-coördinaat bekend, alsmede de boven- en/of onderkant van het filter. De toekenning van een filter aan de juiste modelkolom op basis van de XY-coördinaat is triviaal. De toekenning aan de juiste modellaag verdient hier echter nadere uitleg.

De filters werden toegekend aan die zandige modellaag die de grootste overlap heeft met het filter. Mocht het bijvoorbeeld zo zijn dat het filter overlap heeft met modellagen 2 t/m 4, waarvan 2 en 4 zandig zijn en 3 kleilig, en laag 2 overlapt voor 10 cm met het filter en laag 4 overlapt voor 50 cm met het filter, dan is het filter toegekend aan laag 4. Zoals in de vorige sectie reeds is gemeld zijn filters die helemaal geen overlap hebben met een zandige modellaag uit de kalibratieset verwijderd.



Indien alleen een boven- of onderkant van een filter bekend was, is aangenomen dat het filter een lengte heeft van 1 meter en is in overeenstemming met de overlap met modellen berekend.

#### 4.2.3 Zoet-zoutcorrectie en statistische verwerking van de meetreeksen

Omdat een stationaire kalibratie is uitgevoerd zijn niet de meetreeksen zelf, maar de mediane stijghoogtewaarde en de bijbehorende onzekerheid (variantie) invoer voor de kalibratie. De mediane stijghoogtewaarde is de waarde waar de modeluitvoer uiteindelijk mee vergeleken wordt. De variantie van de mediane stijghoogte bepaalt het gewicht dat de meting meekrijgt in de kalibratie. Metingen die onzekerder zijn krijgen een lager gewicht bij de berekening van de doelfunctie die tijdens de kalibratie geminimaliseerd wordt.

Om tot de mediane waarden en de variantie daarvan te komen zijn de volgende stappen uitgevoerd met de 606 overgebleven meetreeksen:

1. Met behulp van het hierboven reeds genoemde tijdreeksanalysemodel zijn de meetreeksen ontdaan van uitschieters;
2. Vervolgens zijn de meetreeksen zodanig geïnterpoleerd dat voor elke dag tussen 01-01-1999 en 31-12-2000 een stijghoogte voorhanden was. Het resultaat is dus een regelmatige ("homogene") tijdreeks tussen begin- en einddatum van de reeks (met begindatum altijd in 1999 en einddatum altijd in 2000);
3. De mediane waarden van de geïnterpoleerde stijghoogtereeksen zijn bepaald; dit zijn de uiteindelijke waarden waar de modeluitkomsten mee vergeleken worden; stijghoogten over de winter en zomer zijn niet apart genomen.
4. De mediane stijghoogtewaarden zijn gecorrigeerd voor zoutgehalte. Vanwege de hogere dichtheid van zout water zal in peilbuizen die zout water vangen bij gelijke druk een lagere waterkolom staan dan in peilbuizen die zoet water vangen. Om voor dit effect te corrigeren zijn de uit de metingen berekende mediane stijghoogten als volgt aangepast:

$$H_{med, corr} = H_{med} + corr = H_{med} + z * 0.025 * ([Cl]/18600) \quad (5)$$

waarin:

$H_{med}$	=	de uit de homogene meetreeks gedestilleerde mediane waarde van de stijghoogte (m)
$H_{med, corr}$	=	de voor dichtheidseffecten gecorrigeerde waarde van $H_{med}$ (m)
corr	=	zoet-zoutcorrectie (m)
z	=	hoogte van de waterkolom in de peilbuis (genomen als $H_{med}$ – onderkant filter) (m)
0.025	=	benodigde correctie per meter waterkolom bij een chloride concentratie van 18600 mg Cl/l (-)
[Cl]	=	chloride concentratie in het filter in (mg Cl/l)

De chloride concentraties uit de filters zijn op twee verschillende manieren geschat:

- In 341 van de 606 filters zijn gedurende de kalibratieperiode (1-1-1991 t/m 31-12-2000) één of meerdere malen chloridemetingen verricht. Hieruit kon een mediane waarde worden gedestilleerd welke vervolgens in Vergelijking (5) kon worden toegepast;
  - voor de overige 265 filters/meetreeksen is gebruik gemaakt van het door Pebesma (2009) geconstrueerde 3D initiële verdeling van chloride concentraties (zie paragrafen 2.3 en 3.7).
5. Om de onzekerheid omtrent de mediane waarden te kwantificeren is vervolgens het aantal zogenaamde effectieve metingen per meetreeks bepaald; dit zijn het aantal

- “voldoende ongecorrleerde” metingen in de reeks. Met behulp van dit aantal effectieve metingen kon vervolgens de variantie ( $\sigma_{\text{Hmed}}^2$ ) van de reeks berekend worden;
6. Bij deze variantie is de onzekerheid opgeteld die gemoeid is met de zoet-zoutcorrectie. De standaarddeviatie van de gemiddelde zoet-zoutcorrectie is voor de meetreeksen waarvoor directe chloride concentratie metingen voorhanden waren berekend volgens de vergelijking voor de standaardfout van het gemiddelde:

$$\sigma_{zz} = \sigma_{\text{corr}} / \sqrt{n} \quad (6)$$

waarin:

$\sigma_{zz}$	=	de standaarddeviatie van de gemiddelde zoet-zoutcorrectie
$\sigma_{\text{corr}}$	=	de standaarddeviatie van de zoet-zoutcorrectie
n	=	het aantal zoet-zoutcorrecties dat berekend kon worden voor het filter, ofwel het aantal [Cl]-metingen dat voor het filter beschikbaar was

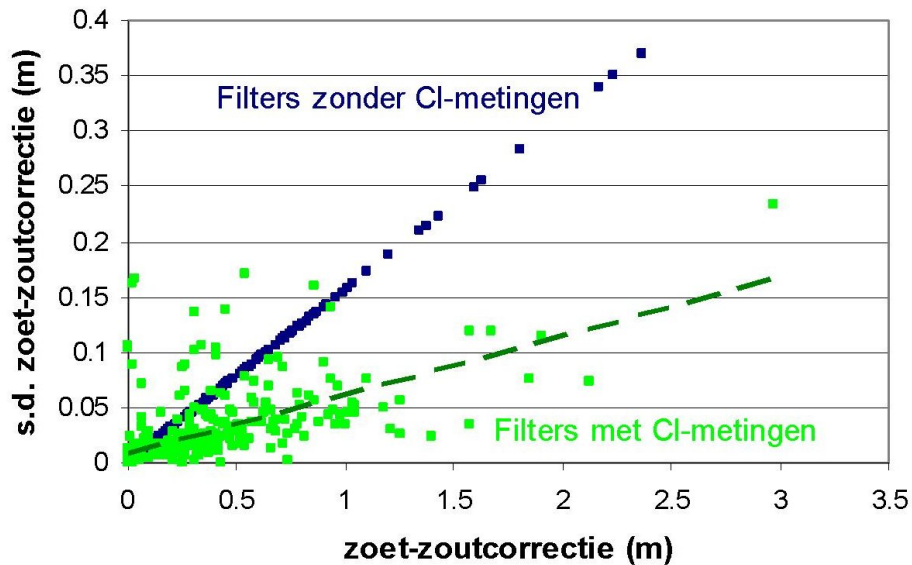
Voor de filters waarvoor geen chloride concentratie metingen beschikbaar waren en de zoet-zoutcorrectie daarom geëxtraheerd moest worden uit het geïnterpoleerde 3D-grid van Cl-concentraties van Pebesma (2009) kon niet eenduidig een maat voor de onzekerheid van deze correctie gekwantificeerd worden. Hier is pragmatisch te werk gegaan: als uitgangspunt is genomen dat de zoet-zoutcorrecties die afgeleid moesten worden uit het 3D-grid onzekerder zijn dan de zoet-zoutcorrecties die afgeleid konden worden uit directe chloride concentratie metingen. Voorts is aangenomen dat bij het (diepe, zoute) filter zonder chloride concentratie metingen met de grootste zoet-zoutcorrectie de standaarddeviatie van de zoet-zoutcorrectie tweemaal zo groot is als de maximale zoet-zoutcorrectie die is toegepast op de stijghoogtes van de filters waarvoor directe chloride concentratie metingen voorhanden waren. Vervolgens is de standaardafwijking van de zoet-zoutcorrectie van een filter zonder chloride concentratie metingen berekend als:

$$\sigma_{zz} = 2 * (\text{corr} / \text{corr}_{\text{max1}}) * \sigma_{zz, \text{max1}} \quad (7)$$

waarbij:

$\text{corr}_{\text{max1}}$	=	de maximale zoet-zoutcorrectie die is toegepast op de stijghoogtes van de filters waarvoor directe chloride concentratie metingen voorhanden waren;
$\sigma_{zz, \text{max1}}$	=	de maximale standaarddeviatie van de gemiddelde zoet-zoutcorrectie zoals berekend volgens Vergelijking (6) voor de filters waarvoor directe chloride concentratie metingen voorhanden zijn.

Vergelijking (7) laat zien dat ervan uitgegaan is dat de standaardafwijking van de zoet-zoutcorrectie toeneemt als de correctie groter wordt. Deze aanname is geïnspireerd door het feit dat voor de filters *met* chloride concentratie metingen, naast het aantal chloride concentratie metingen, de grootte van de correctie de belangrijkste verklarende factor is voor de grootte van de standaardafwijking van de correctie. Het verband tussen de grootte van de zoet-zoutcorrectie en de standaarddeviatie van deze correctie wordt zowel voor de filters zonder chloride concentratie metingen als voor de filters met chloride concentratie metingen getoond in Figuur 4.1. De figuur illustreert tevens de aanname van een gemiddeld grotere onzekerheid van de zoet-zoutcorrecties bij afwezigheid van directe chloride concentratie metingen, volgend uit Vergelijking (7) (vergelijk de helling van de blauwe punten (filters zonder chloride concentratie metingen) met de helling van de regressielijn behorend bij de groene punten (filters met chloride concentratie metingen)).



Figuur 4.1: De standaardafwijking (s.d.) van de gemiddelde zoet-zoutcorrectie, als functie van de grootte van deze correctie.

De totale variantie (onzekerheid) van de voor dichtheidseffecten gecorrigeerde mediane stijghoogtewaarde van een reeks wordt daarmee (gebruikmakend van de optelbaarheid van onafhankelijke varianties):

$$\sigma_{\text{Hmed,corr}}^2 = \sigma_{\text{Hmed}}^2 + \sigma_{\text{zz}}^2 \quad (8)$$

#### 4.2.4 Aanvullende afgevalen meetreeksen

Bij de vergelijking tussen de op de hierboven beschreven wijze verkregen kalibratieset met de modeluitkomsten zijn bij nader inzien een aantal aanvullende meetreeksen niet geschikt bevonden voor gebruik in de kalibratie. Het gaat hierbij om:

- alle meetreeksen uit het duingebied van Schouwen-Duiveland. De afwijkingen tussen de modelwaarden en de meetwaarden zijn hier dusdanig groot dat de conclusie is getrokken dat er nog te grote conceptuele fouten zitten in de modellering van dit gebied om de residuen middels parameteraanpassingen trachten te verkleinen. Om deze reden zijn alle meetreeksen (72 in totaal) afkomstig uit het gebied met X-coördinaat < 40934 en Y-coördinaat > 410227 (Rijksdriehoeksstelsel) uit de kalibratieset verwijderd<sup>8</sup>.
- meetreeksen van 5 peilbuizen (in totaal 17 reeksen) waarvan een sterk vermoeden is ontstaan dat de grote afwijking van de modelvoorspelling (> 1.5 m) gerelateerd is aan een hoge mate van onzekerheid van, en daardoor waarschijnlijk grote fout in, de grote (> 1.5 meter) zoet-zoutcorrecties die hier zijn toegepast. Het gaat hier alleen om meetreeksen waarvoor geen directe zoutconcentratiemetingen beschikbaar waren.

<sup>8</sup> Er is binnen deze opdracht geen budget beschikbaar om het regionale Zeeland model voor lokale situaties te verbeteren. Er kunnen verschillende concepten de oorzaak zijn dat in dit duingebied een mismatch is tussen gemodelleerde en gemeten grondwaterstanden en stijghoogten. Er valt te denken aan: schijnwaterspiegels, het grof modelleren in het Zeeland model van de zone boven NAP, al dan niet aanwezige niet-gekarteerde weerstandslagen, de dynamische grondwateraanvulling verloopt door aanwezigheid van een grote onverzadigde zone anders dan in overige gebieden, etc. De Provincie Zeeland heeft overigens voor dit gebied een lokaal grondwater model tot zijn beschikking.

Na het verwijderen van deze meetreeksen bestaat de definitieve kalibratieset uit 517 mediane stijghoogtewaarden.

### 4.3 Kalibratiemethode

#### 4.3.1 Kalibratiealgoritme en schematisatie

Voor het vinden van de optimale set modelparameters (de set parameters die resulteert in een optimale fit tussen modeluitkomsten en metingen) is gebruik gemaakt van het softwareprogramma PEST (Doherty, 2005). De parameterset wordt daarbij geoptimaliseerd door te zoeken naar het minimum van de volgende doelfunctie:

$$J_{meas} = \sum_{i=1}^m (w_i (H_{model,i} - H_{med,corr,i}))^2 \quad (9)$$

waarbij:

$J_{meas}$	=	de doelfunctie
$H_{model,i}$	=	de modelvoorspelling van meting $i$
$H_{med,corr,i}$	=	de meetwaarde van meting $i$ ( $H_{med,corr}$ )
$w_i$	=	het gewicht dat werd toegekend aan meting $i$
$m$	=	het totaal aantal metingen

De gewichten die toegekend werden aan de metingen zijn direct gerelateerd aan de berekende varianties van de metingen (Vergelijking (10)):

$$w_i = \frac{1}{\sigma_{H_{med,corr,i}}} \quad (10)$$

PEST maakt voor het minimaliseren van Vergelijking (9) gebruik van het Levenberg-Marquart zoekalgoritme. Een beperking van deze methode is dat het aantal te optimaliseren parameters relatief klein gehouden moet worden, enerzijds omdat de kalibratie anders te rekenintensief wordt en anderzijds omdat het bij toenemende parameteraantallen onvermijdelijk is dat parameters onderling sterke correlatie gaan vertonen, wat een desastreus effect op het verloop van de kalibratie kan hebben. Een voordeel van de methode is de relatieve eenvoud ervan, en het feit dat deze methode, bij een beperkt aantal te kalibreren parameters, voldoende snel is zodat het model gekalibreerd kan worden zonder dat er eerst een opschaling (grotere modelcellen, modellen samen nemen) van het model noodzakelijk is. Bij terugschaling na kalibratie zou in dat geval het kalibratieresultaat kunnen verslechteren, wat het voordeel van het gebruik van meer geavanceerde, rekenintensievere kalibratiemethoden teniet zou kunnen doen.

Om het aantal te kalibreren parameters binnen de perken te houden zijn de onderscheiden lagen van het ondergrondmodel beschouwd als homogene zones. Per homogene zone is één parameter gekalibreerd: de horizontale doorlatendheid ( $K_h$ ). De verhouding tussen  $K_h$  en de verticale doorlatendheid ( $K_v$ ) –ook wel anisotropie– werd steeds constant verondersteld:  $K_h/K_v = 3$ . Omdat over het algemeen alleen de  $K_h$  van aquifers en de  $K_v$  van aquitards (scheidende lagen) ertoe doen doordat in aquifers de horizontale stroming domineert over verticale stroming en in aquitards andersom, betekent deze aanpak effectief dat de  $K_h$ 's van de aquifers en de  $K_v$ 's van aquitards worden gekalibreerd, en dat de  $K_v$ 's van aquifers en  $K_h$ 's van aquitards hierop meeliften.

Naast de doorlatendheden van het ondergrondmodel zijn bovendien tevens de weerstanden van de waterlopen (categorieën 1, 2, 4, 5 en 6, zie paragraaf 3.9.3) en de

grondwateraanvulling gekalibreerd. Per waterloopcategorie werd één weerstandswaarde gekalibreerd welke werd toegepast op alle waterlopen van de betreffende categorie. Voor het veld van grondwateraanvulling werd één vermenigvuldigingsfactor gehanteerd waarmee het gehele veld werd aangepast.

Voor elke te kalibreren parameter dient in PEST een ondergrens en een bovengrens opgegeven te worden. Daartussen is een uniforme kansverdeling aangenomen. De gehanteerde boven- en ondergrenzen worden per parametergroep opgegeven in Tabel 4.1. De toegestane afwijkingen ten opzichte van de initiële waarden weerspiegelen de onzekerheid van de initiële waarden.

*Tabel 4.1 Toegestane boven- en ondergrens van de gekalibreerde parameters, per parametergroep. Met "initiële waarde" wordt de parameterwaarde bedoeld zoals die in de modelbouwfase is toegekend.*

<b>Parametergroep</b>	<b>Ondergrens</b>	<b>Bovengrens</b>
$K_h$ aquifers	1/3 * initiële waarde	3* initiële waarde
$K_h$ aquifers	1/5 * initiële waarde	5 * initiële waarde
Weerstand waterlopen	1/10 * initiële waarde	10 * initiële waarde
Grondwateraanvulling	0.9 * initiële waarde	1.1* initiële waarde

Het is duidelijk dat met het hanteren van homogene parameterzones bij de kalibratie de flexibiliteit verloren gaat om ook lokaal parameteraanpassingen door te voeren die in een betere fit met de metingen kunnen resulteren. Het toestaan van meer lokale parametervariëaties zou meer recht doen aan de heterogeniteiten waarvan bekend is dat deze bestaan. Om een deel van de verloren flexibiliteit terug te winnen is het modelgebied onderverdeeld in 5 deelgebieden, welke afzonderlijk zijn gekalibreerd. De te kalibreren parameters kunnen dus tussen deze deelgebieden variëren. Bij de kalibratie is onderscheid gemaakt in de volgende deelgebieden:

1. Schouwen-Duiveland/Goeree-Overflakkee
2. Walcheren/Noord-Beveland
3. Tholen/St. Philipsland
4. Zuid-Beveland
5. Zeeuws-Vlaanderen

#### 4.3.2 Gevoeligheidsanalyse

Parameters waarvoor het model op de meetlocaties geen gevoeligheid vertoont kunnen niet gekalibreerd worden. Immers, de metingen bevatten dan geen informatie over deze parameters. Per deelgebied zijn daarom alleen die parameters gekalibreerd waarvoor het model een redelijke mate van gevoeligheid vertoont op de meetlocaties. Om erachter te komen welke parameters dat zijn, is per deelgebied een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met behulp van het programma SENSAN (Doherty, 2005). Met dit programma zijn, op geautomatiseerde wijze, de  $K_h$ 's, de weerstanden van de waterlopen en de grondwateraanvulling van het model één voor één geperturbeerd (oorspronkelijke parameterwaarde plus en min 50%) en werd na elke perturbatie een modelrun uitgevoerd en de resultaten (stijghoogtes) op de meetlocaties geadministreerd. Vervolgens werd bekeken van welke parameters de perturbaties de grootste invloed hadden gehad op de stijghoogtes op de locaties van de metingen. Per deelgebied werden die parameters, waarvan beide perturbaties een gesommeerd absoluut verschil in stijghoogte op de meetlocaties van meer dan 1 meter tot gevolg hadden, geselecteerd voor kalibratie.

De gevoeligheidsanalyse resulteerde in een reductie van het aantal te kalibreren parameters van 71 (65  $K_h$ 's, 5 waterloopsweerstanden en de grondwateraanvulling) naar 39 parameters (in deelgebied 1) tot 20. Voor de gekalibreerde parameters per deelgebied zie Bijlage 8C.



### 4.3.3 Regularisatie

Volgens de hierboven beschreven methode en schematisatie is de kalibratie eerst uitgevoerd met behulp van PEST's "estimation mode". Dat houdt hier in dat PEST de opdracht kreeg om binnen de in Tabel 4.1 aangegeven grenzen te zoeken naar de parametercombinatie die Vergelijking (9) minimaliseert, zonder daarbij de afwijkingen ten opzichte van de initiële parameterwaarden op enigerlei wijze te bestraffen. PEST's "estimation mode" resulteerde in grote parameteraanpassingen; een groot aantal parameters werd door PEST op de in Tabel 4.1 aangegeven boven- en ondergrenzen gezet. In een aantal gevallen is zo'n grote parameteraanpassing te rechtvaardigen, vanwege de grote parameteronzekerheden en/of een aanzienlijke reductie van de doelfunctie. In andere gevallen kan eenzelfde reductie van de doelfunctie echter bereikt worden met minder grote parameteraanpassingen, door het effect dat de heftig aangepaste parameter gesorteerd heeft mede teweeg te laten brengen door andere, gecorreleerde parameters. De benodigde parameteraanpassingen worden hiermee verspreid over meerdere parameters, waardoor heftige aanpassingen (deels) voorkomen kunnen worden. Vooral van parameters met een relatief geringe gevoeligheid (welke vanwege die geringe gevoeligheid juist een flinke slinger kunnen krijgen tijdens de kalibratie om toch een effect op de residuen te realiseren) en van parameters die sterke correlaties vertonen met andere parameters kunnen op deze manier de aanpassing beperkt worden zonder grote gevolgen voor de doelfunctie.

Door PEST te laten draaien in "regularisation mode" kunnen parameteraanpassingen (t.o.v. de oorspronkelijke waarden) bestraft worden in de doelfunctie:

$$J_{regul} = J_{meas} + \sum_{i=1}^n (v_i (Z_{posterior} - Z_{prior}))^2 \quad (11)$$

waarin

$Z_{posterior,j}$

= de geijkte waarde van parameter  $j$

$Z_{prior,j}$

= de initiële schatting van de waarde van parameter  $j$

$v_i$

= het gewicht dat werd toegekend aan meting  $i$  (in de huidige studie geldt  $v_j = 1$  voor alle  $j$ )

$n$

= het totaal aantal parameters waarvoor aanpassingen bestraft worden in de doelfunctie (in de huidige studie zijn dit alle parameters)

Vanuit de "estimation mode" is de "realiseerbare" waarde van  $J_{meas}$  (Vergelijking (9)) bekend, samen met de parameterset waarmee  $J_{meas}$  is geminimaliseerd. Door nu  $J_{regul}$  te minimaliseren en daarbij  $J_{meas}$  (plus een kleine marge) als maximum toegestane waarde op te geven, zoekt PEST naar een combinatie van parameters waarbij  $J_{meas}$  (plus een kleine marge) nog steeds gerealiseerd wordt maar nu met zo klein mogelijke parameteraanpassingen, daarbij gebruik makend van de aanwezige parametercorrelaties. Het resultaat is een fysisch realistischere parameterset, indien men althans enig vertrouwen heeft in de initiële schattingen van de parameterwaarden.

De "regularisation mode" is net als de "estimation mode" voor elk deelgebied apart uitgevoerd.

## 4.4 Kalibratieresultaat

Tabel 4.2 geeft per deelgebied de mediane waarde van de residuen, de gemiddelde absolute waarde van de residuen, en de waarde van  $J_{meas}$ .

Tabel 4.2 Kalibratieresultaat.

<b>Deelgebied</b>	<b>Mediane waarde residuen (m)</b>	<b>Gemiddelde absolute residu (m)</b>	<b><math>J_{meas}</math> (<math>m^2</math>)</b>
<b>Schouwe-Duiveland/Goeree-Overflakkee</b>	-0.06 → 0.06	0.38 → 0.35	21709 → 13221
<b>Walcheren/Noord-Beveland</b>	0.18 → 0.17	0.33 → 0.31	7349 → 4909
<b>Tholen/St.Philipsland</b>	-0.03 → 0.004	0.42 → 0.31	7762 → 3835
<b>Zuid-Beveland</b>	0.16 → 0.03	0.27 → 0.20	4380 → 2409
<b>Zeeuws-Vlaanderen</b>	0.18 → -0.009	0.29 → 0.24	8318 → 6393

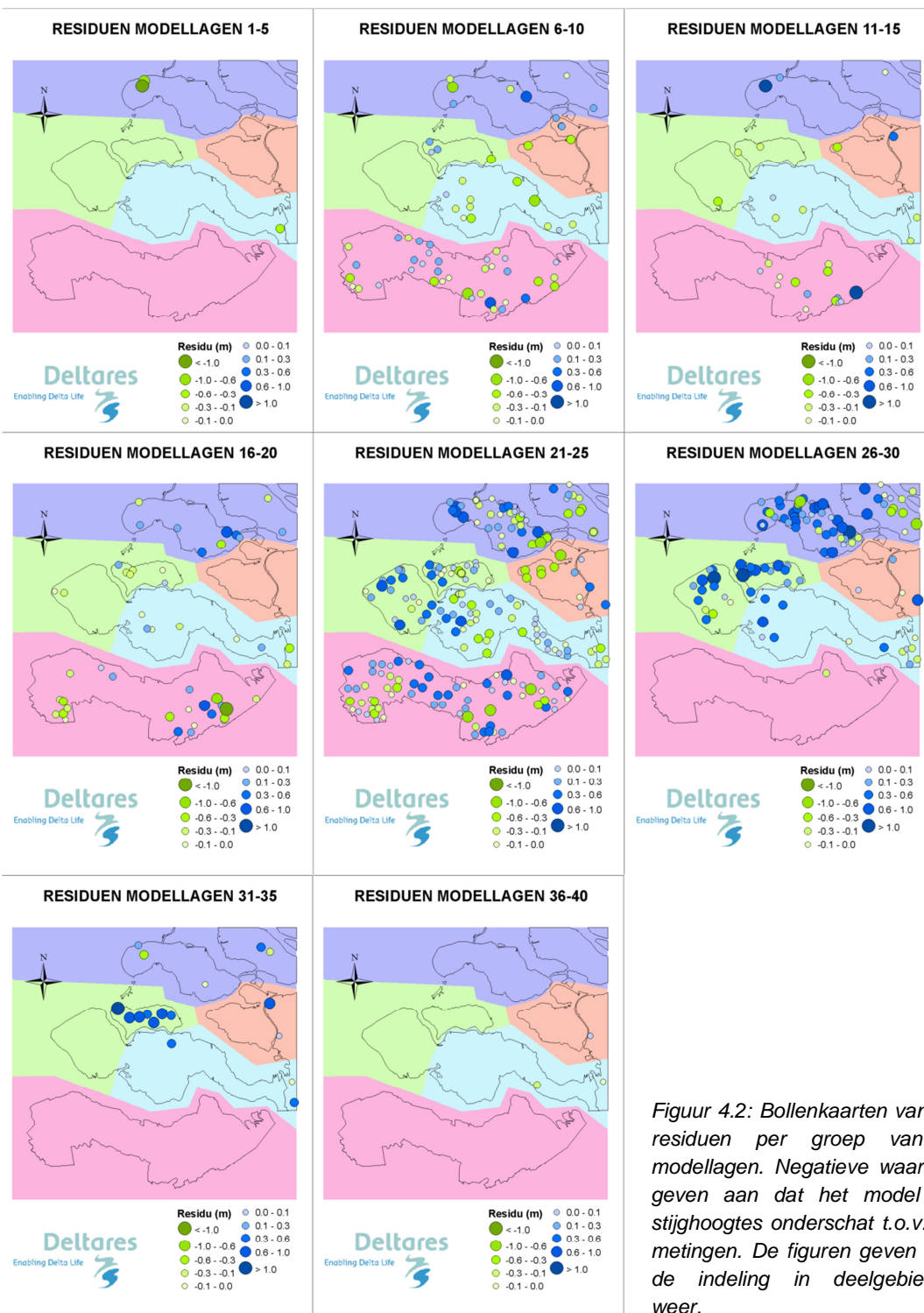
Bij een succesvolle kalibratie dient de mediane waarde van de residuen dicht bij nul te liggen, omdat anders het model een duidelijke systematische afwijking ("bias") heeft richting ofwel onderschattingen dan wel overschattingen van de stijghoogtes. Het model is dan respectievelijk te "droog" of te "nat". In Tabel 4.2 valt af te lezen dat er na ijking in geen van de deelgebieden sprake is van een duidelijke systematische afwijking.

Het gemiddelde absolute residu geeft aan hoe goed, in absolute zin, de meetwaarden door het model gereproduceerd worden. Hoe kleiner deze waarde, hoe beter het modelresultaat (stijghoogten) op de meetlocaties overeenkomt met de mediane meetwaarden.

Een even belangrijk (maar in rapportages vaak vergeten) onderdeel van het kalibratieresultaat is de waarde van de doelfunctie  $J_{meas}$ . In  $J_{meas}$  zijn namelijk niet alleen de residuen verdisconteerd, maar tevens de betrouwbaarheid van de meetwaarden. Bij gelijke waarde van het gemiddelde absolute residu dat tijdens de kalibratie bereikt wordt, is een gekalibreerd model dat voornamelijk de minder betrouwbare meetwaarden goed reproduceert minder valide dan een model dat vooral de zeer betrouwbare metingen goed reproduceert. Een sterke reductie van  $J_{meas}$  tijdens de kalibratie geeft aan dat de kalibratie geresulteerd heeft in een betrouwbaarder model, zelfs als de reductie van het gemiddelde residu marginaal zou zijn. In Tabel 4.2 is te zien dat in alle deelgebieden de waarde van  $J_{meas}$  sterk teruggebracht is. Figuur 4.2 geeft, per groep van 5 modellagen, zogenaamde bollenkaarten van de afwijkingen die het gekalibreerde model geeft ten opzichte van de mediane meetwaarden.

De conclusie is dat de gemodelleerde zoetwaterstijghoogten de gemeten waarden goed benaderen. Tijdens de ijking is de mediane waarde van de residuen teruggebracht in alle vijf de deelgebieden, met een maximale waarde van 0.17m. De aanpak heeft geleid tot een betrouwbaarder numeriek model van het grondwatersysteem van Zeeland, ondanks dat de gemiddelde absolute residuen naar slechts maximaal 0.35 m zijn teruggebracht.

In Bijlage 8B worden per deelgebied voor alle gekalibreerde parameters de initiële en de gekalibreerde parameterwaarden gegeven, en de daaruit volgende aanpassingsfactoren.



Figuur 4.2: Bollenkaarten van de residuen per groep van 5 modellagen. Negatieve waarden geven aan dat het model de stijghoogtes onderschat t.o.v. de metingen. De figuren geven ook de indeling in deelgebieden weer.

## 5 Equation Section (Next)Modeluitkomsten

### 5.1 Inleiding

De volgende vier modelscenario's zijn met het model doorgerekend tot het jaar 2050:

- 7.1 **aut**: referentie case met het autonome scenario
- 7.2 **W+zss**: klimaatscenario W+ met alleen zeespiegelstijging
- 7.3 **W+gwa**: klimaatscenario W+ met alleen verandering in grondwateraanvulling
- 7.4 **W+**: klimaatscenario W+ met zeespiegelstijging én verandering in grondwateraanvulling

Doel van het modelleren is het volgende te bepalen:

- de huidige situatie (2010) van het grondwatersysteem qua zoet-zout en stijghoogte verdeling, en kwel en infiltratiefluxen (scenario aut, 2010)
- de situatie in zoet-zout verdeling, stijghoogte distributie en kwel en infiltratiefluxen in 2050 onder het meest waarschijnlijke scenario inclusief zeespiegelstijging en verandering in grondwateraanvulling (scenario W+, 2050)
- apart de effecten van het autonome verziltingsproces, de zeespiegelstijging, en de verandering in grondwateraanvulling (scenario's aut, W+zss en W+gwa, 2050)

De zeespiegelstijging wordt aan het model toegevoegd als een stapsgewijze vijfjaarlijkse verhoging van het waterpeil in het buitenwater (Figuur 5.28b). Conform het KNMI W+ scenario (zie Tabel 2.1) zou voor het jaar 2100 t.o.v. 2010 de zeespiegelstijging 85cm zijn. Dit is  $85\text{cm}/90\text{jaar}=0.9444\text{cm/jaar}$ . Het model begint met 2010 te rekenen met huidig gemiddeld zeeniveau; in 2015 komt er bijna 5cm bij en in 2050 –het laatste simulatiejaar– 38cm. De toekomstige grondwateraanvulling is moeilijk direct te bepalen aan de hand van KNMI06-scenario's (bij de KNMI14-scenario's is dat overigens niet wezenlijk anders (Klein Tank et al., 2015)). We nemen het volgende: het neerslagoverschot (paragraaf 3.11) verandert (zie Tabel 2.1) over de komende 40 jaar (2010-2050) in totaal  $+12.4\%$ <sup>9</sup> in de winter en  $-16.9\%$  in de zomer. De veranderingen in grondwateraanvulling worden elke vijf jaar stapsgewijs opgelegd aan het numerieke model.

Het model rekent verder met halfjaargemiddelde waarden voor het zomer- en winterpeil van het oppervlaktewater en met constante grondwateronttrekkingen. De modellen zijn tijdsafhankelijk doorgerekend op decadebasis. De huidige situatie (2010) is bepaald door het grondwater model 40 jaar te laten rekenen om op deze manier de veelal oude metingen te vertalen naar de huidige situatie, zie ook paragraaf 3.7. Het grondwater model heeft zodoende gediend als extra interpolator voor de metingen. Voor de resultaten van het jaar 2010 zijn de gemiddelde grondwateraanvulling en grondwateronttrekkingen gebruikt van de periode 1990 – 2000. De daadwerkelijke grondwateraanvulling van 2010 zal ietwat andere resultaten opleveren voor met name de kwelkaarten, zoutvrachtkaarten, grondwaterstand en in mindere mate de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket.

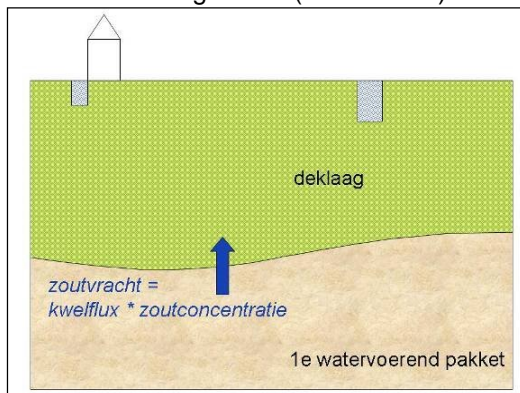
De zoutvracht van het grondwatersysteem naar het oppervlaktewater systeem is gedefinieerd als (Figuur 5.1):

$$\text{zoutvracht} = \text{kwelflux} * \text{chloride concentratie grondwater}.$$

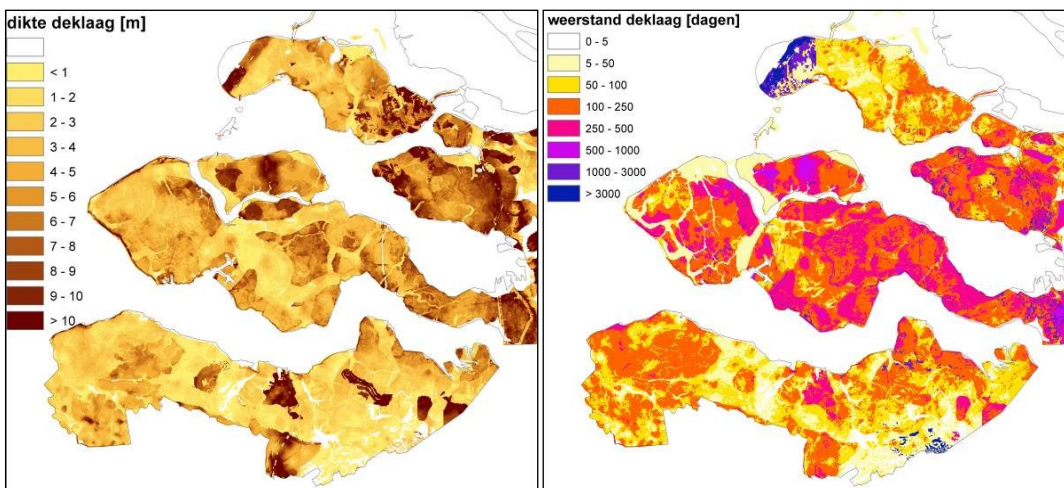
De resultaten van de chloride concentratie, kwel en zoutvracht worden weergegeven aan de onderkant van de Holocene deklaag (zie Figuur 5.2 voor dikte en hydraulische weerstand

<sup>9</sup> 40/90 deel over  $+28\%$  is  $12.4\%$  en 40/90 deel over  $-38\%$  is  $-16.9\%$ , zie Tabel 2.1.

deklaag) indien de deklaag aanwezig is. De aanname hierbij is dat de kwelflux en bijbehorende zoutvracht die door de deklaag stroomt uiteindelijk in het oppervlaktewatersysteem terecht komt. Als er geen deklaag aanwezig is wordt de waarde van de vijfde modellaag onder maaiveld gebruikt (-2.5 m NAP).



Figuur 5.1: definitie van de zoutvracht van het grondwatersysteem naar het oppervlaktewatersysteem.



Figuur 5.2: a. dikte Holocene deklaag (m) en b. hydraulische weerstand Holocene deklaag (dagen).

Bij de situatie met alleen autonome processen, dus zonder zeespiegelstijging en bodemdaling, is er geen externe factor die voor verandering van de grondwaterstroming zal zorgen. Alle invoerparameters van het model zijn immers constant voor alle jaren. Het grondwatersysteem, en dan met name de zoet-brak-zout verdeling, is echter nog niet in evenwicht: er zijn nog steeds plekken die (langzaam) verzilten of verzoeten. De stroming van het grondwater zal ook (enigszins) veranderen doordat de verschillen in dichtheid veranderen doordat het zoet-brak-zout verdeling verandert en het zoet-zout grensvlak verplaatst.

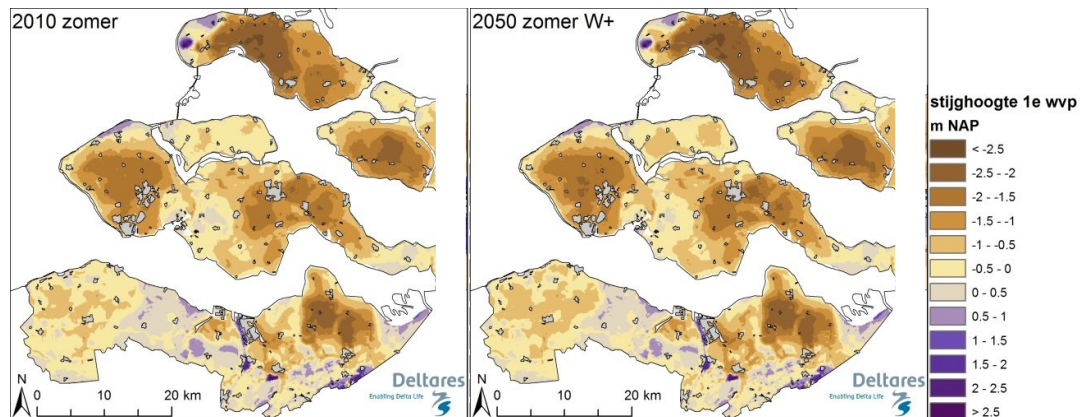
Het autonome scenario staat in de onderstaande figuren weergegeven als 'aut'. Het W+ klimaatscenario bestaat in dit grondwater model uit twee componenten: 1. Zeespiegelstijging en 2. Verandering in grondwateraanvulling. De invloed van deze componenten is zowel apart gekwantificeerd als gezamenlijk. Het scenario met alleen een zeespiegelstijging heet 'W+zss' in de figuren en het scenario met alleen verandering in grondwateraanvulling heet 'W+gwa' in de figuren. Het scenario met zowel zeespiegelstijging als verandering in grondwateraanvulling heet 'W+'. De veranderingen in het grondwatersysteem voor de scenario's 'W+zss', 'W+gwa' en 'W+' zijn ten opzichte van het



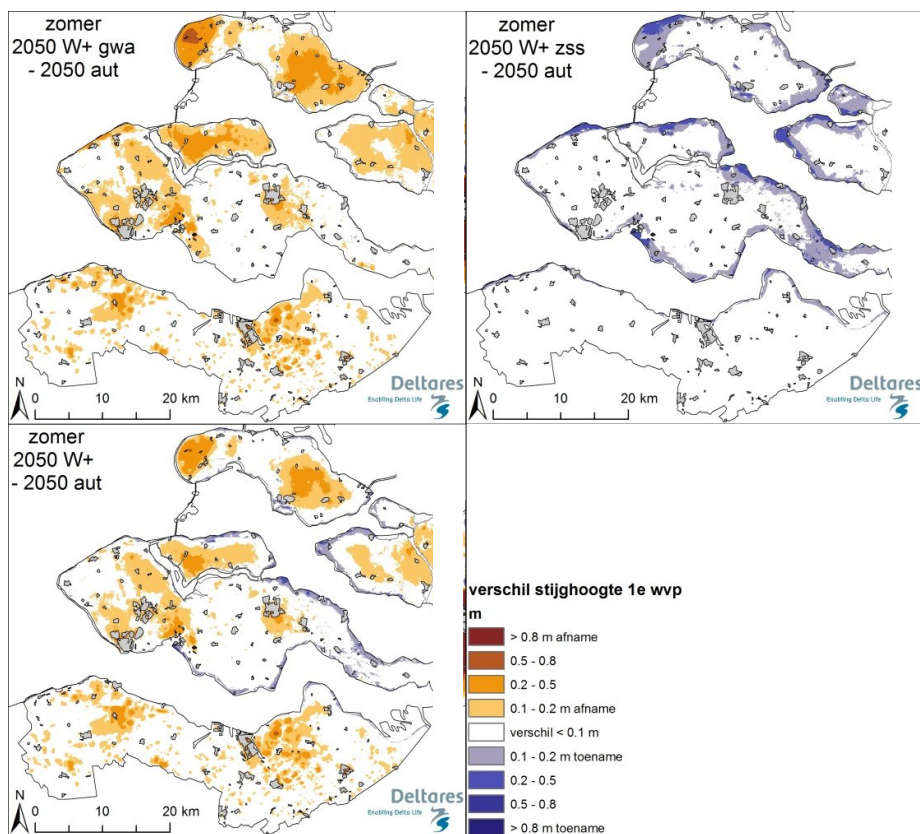
autonome scenario in 2050 zodat echt alleen de invloed van de klimaatverandering getoond wordt.

## 5.2 Stijghoogte eerste watervoerend pakket zomer

In Figuur 5.3 is de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket weergegeven voor het zomerhalfjaar in de huidige situatie (2010) en voor het klimaatscenario W+ voor het jaar 2050. De resultaten laten zien dat de stijghoogte in het klimaatscenario W+ over het algemeen afneemt in het binnenland en toeneemt dicht bij het buitenwater, als gevolg van het gecombineerde effect van de toename van zeespiegelstijging en verandering (afname) in de grondwateraanvulling. In Figuur 5.4 staan de verschillen in stijghoogte tussen het scenario W+zss, W+gwa of W+ in 2050 en het autonome scenario in het jaar 2050 weergegeven, in het eerste watervoerend pakket voor het zomerhalfjaar. De kleinere grondwateraanvulling in de zomer zorgt voor een verlaging van de stijghoogte (Figuur 5.4a). De duingebieden zijn gevoelig voor een afname in de stijghoogte. Zeespiegelstijging zorgt in de zone vanaf de zee, Westerschelde en Oosterschelde voor een toename van de stijghoogte (Figuur 5.4b). Met name gebieden met een hogere doorlatendheid (veel zand in de ondergrond zoals de duinen) tonen een verhoogde stijghoogte; daarbovenop is bij een dikker watervoerend pakket het effect ook groter (in de richting van het noorden neemt de dikte van het watervoerend pakket toe). Het gecombineerde resultaat van afname grondwateraanvulling en verhoging zeespiegel staat in Figuur 5.4c weergegeven.



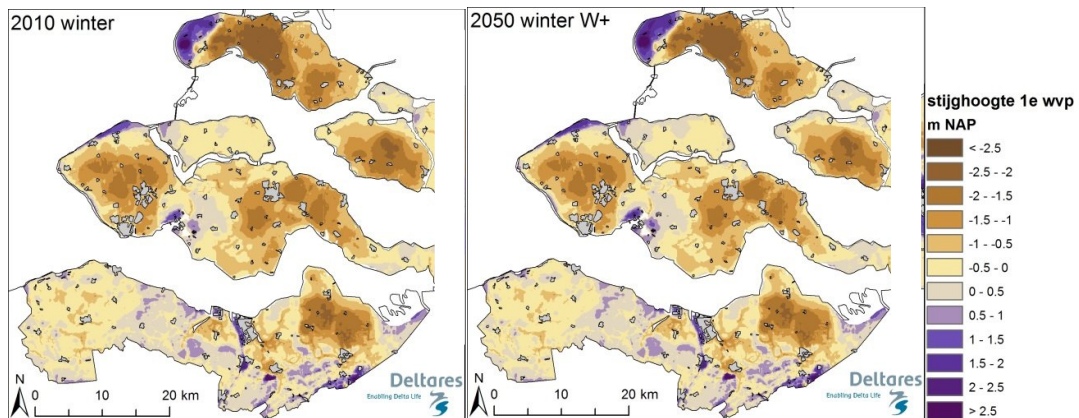
Figuur 5.3: Stijghoogte eerste watervoerend pakket in het zomerhalfjaar in 2010 (links) en 2050 W+ (rechts).



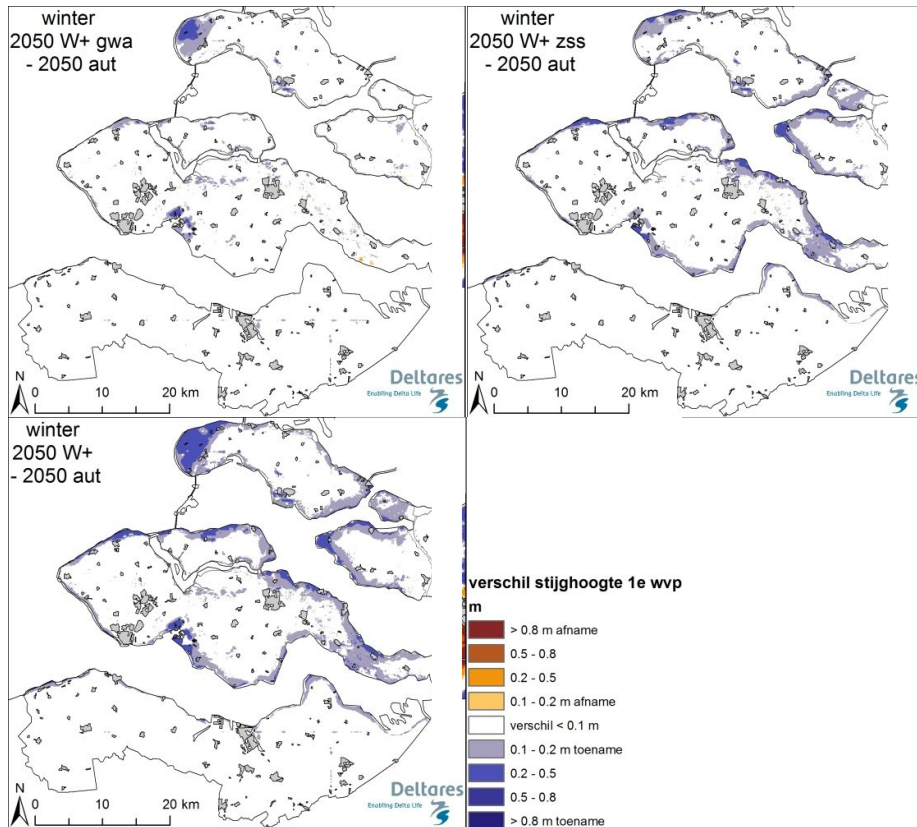
Figuur 5.4: Verschil in stijghoogte eerste watervoerend pakket zomer a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

### 5.3 Stijghoogte eerste watervoerend pakket winter

In Figuur 5.5a staat de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket weergegeven voor het winterhalfjaar in de huidige situatie. Figuur 5.5b toont de stijghoogte van het winterhalfjaar voor klimaatscenario W+. De grotere grondwateraanvulling van W+gwa ten opzichte van de huidige situatie heeft vooral invloed in gebieden zonder drainage (duinen in Figuur 5.6a). In gebieden met drainage zal de afvoer van water toenemen maar door deze extra afvoer zal de stijghoogte nauwelijks veranderen. Zeespiegelstijging zorgt voor een verhoging van de stijghoogte in het winterhalfjaar in de kustzones (Figuur 5.6b). Het gecombineerde resultaat, scenario W+, wordt in Figuur 5.6c getoond.



Figuur 5.5: Stijghoogte eerste watervoerend pakket winter a. 2010 en b. 2050 W+.

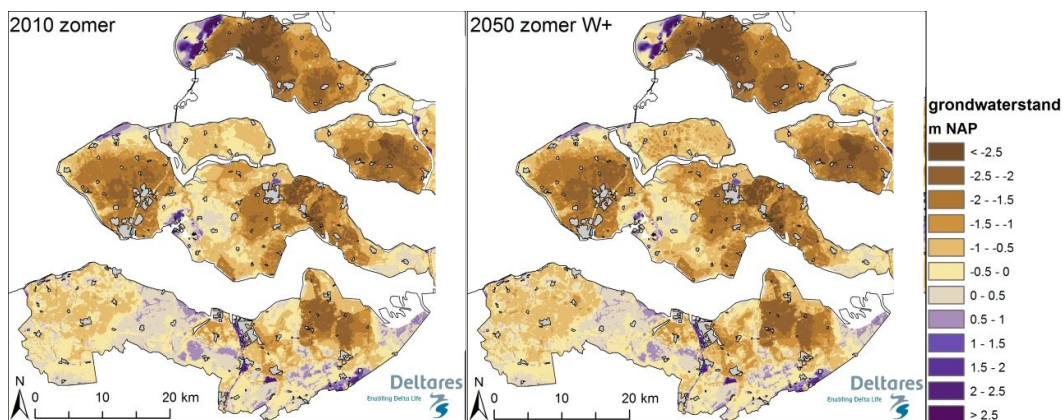


Figuur 5.6: Verschil in stijghoogte eerste watervoerend pakket winter a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

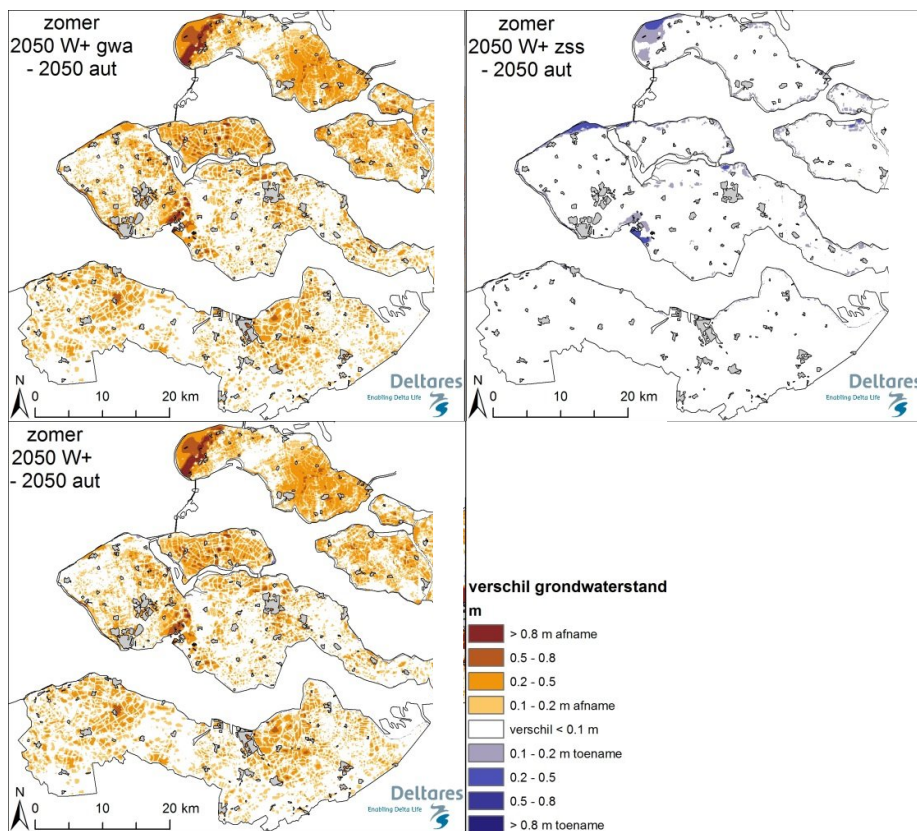
#### 5.4 Grondwaterstand zomer

De grondwaterstand in het zomerhalfjaar voor de huidige situatie staat weergegeven in Figuur 5.7a en voor W+ in het jaar 2050 in Figuur 5.7b. De kleinere grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar zorgt voor een verlaging van de grondwaterstand in de meeste gebieden (Figuur 5.8a). De zeespiegelstijging zorgt slechts lokaal voor een beperkte verhoging van de grondwaterstand (Figuur 5.8b). Het gecombineerde effect, W+, staat weergegeven in Figuur 5.8c; het effect van een zeespiegelstijging lijkt marginaal.





Figuur 5.7: Grondwaterstand zomer a. 2010 en b. 2050 W+.

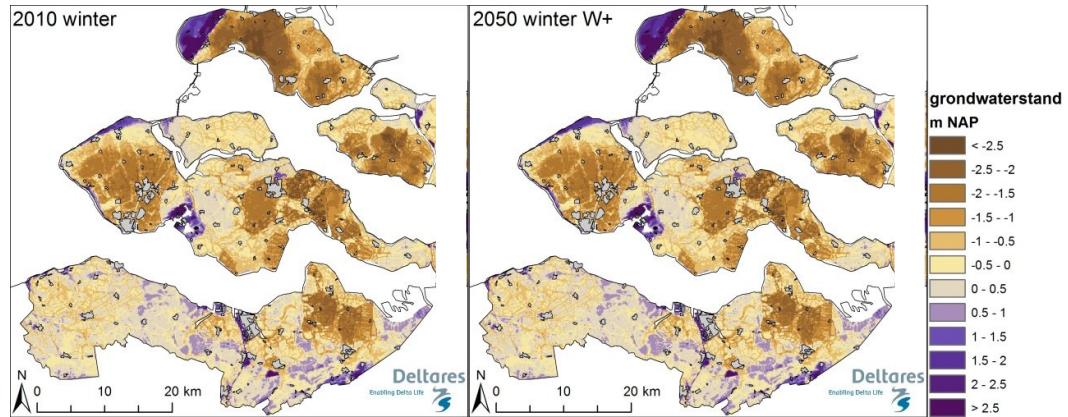


Figuur 5.8: Verschil in grondwaterstand zomer a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

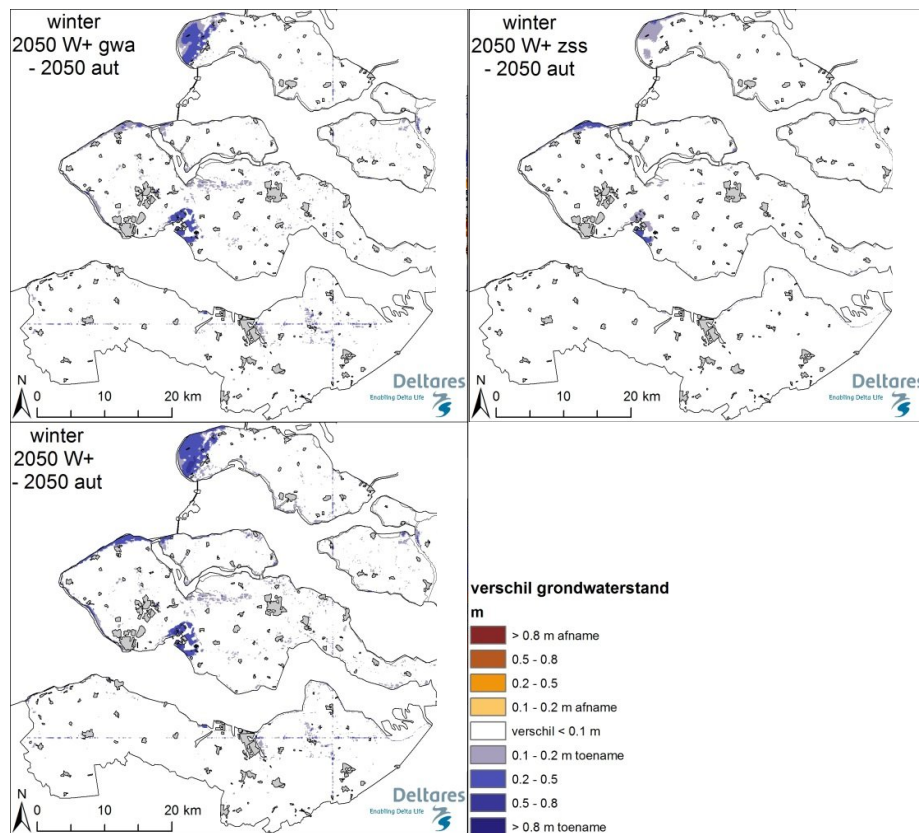
## 5.5 Grondwaterstand winter

De grondwaterstand voor het winterhalfjaar voor de huidige situatie is weergegeven in Figuur 5.9a en voor scenario W+ in 2050 in Figuur 5.9b. Door een hogere gemiddelde grondwateraanvulling in het winterhalfjaar zal de grondwaterstand toenemen (Figuur 5.10a), maar slechts in die gebieden waar het water niet direct wordt afgevoerd. De zeespiegelstijging heeft een zeer beperkte invloed op de grondwaterstand (Figuur 5.10b); significant minder dan het effect op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (Figuur

5.6b). Het gecombineerde effect van grondwateraanvulling en zeespiegelstijging staat weergegeven in Figuur 5.10c.



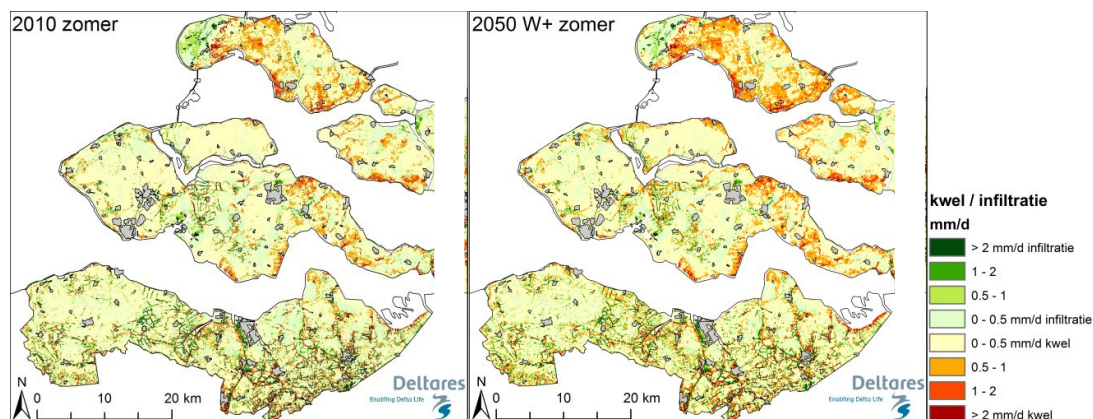
Figuur 5.9: Grondwaterstand winter a. 2010 en b. 2050 W+.



Figuur 5.10: Verschil in grondwaterstand winter a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

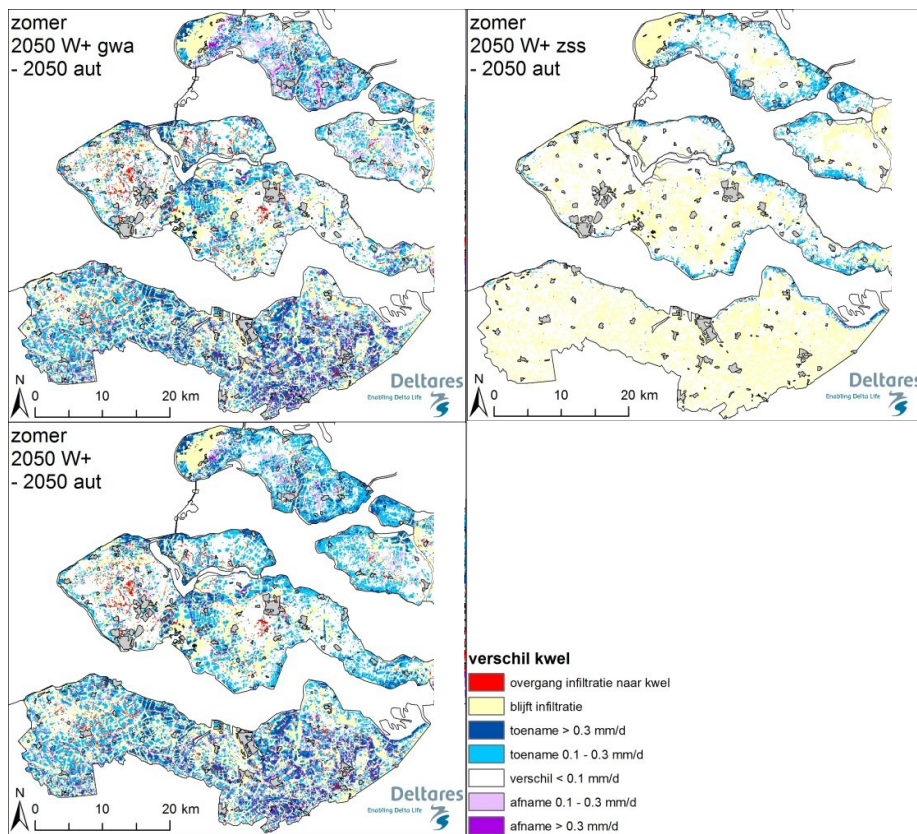
## 5.6 Kwel en infiltratie zomer

Het zomerhalfjaar kent overwegend een neerslagtekort of een zeer klein neerslagoverschot (zuidoosten van het modelgebied), waardoor in het zomerhalfjaar weinig grondwateraanvulling optreedt (Figuur 5.11a). Door de lagere grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar neemt in het W+gwa scenario de grondwaterstand af (Figuur 5.7a). De stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (Figuur 5.4a) wordt ook kleiner maar neemt echter minder af dan de grondwaterstand. Hierdoor neemt de kwel overwegend toe in kwelgebieden (Figuur 5.12a) ten opzichte van de autonome situatie. Er zijn ook gebieden waar de kweldruk afneemt door de lagere grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar (Figuur 5.12a). Dit zijn overwegend gebieden naast infiltratiegebieden. De grondwateraanvulling in de infiltratiegebieden wordt kleiner waardoor er minder kwel is direct naast de infiltratiegebieden. Zeespiegelstijging zorgt voor een verhoging van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (Figuur 5.7b) waardoor de kweldruk toeneemt in een zone rondom de zee, Oosterschelde en Westerschelde (Figuur 5.12b). De resultaten van de combinatie van verandering in grondwateraanvulling en zeespiegelstijging staat in absolute waarde weergegeven in Figuur 5.11b en in verschil ten opzichte van de autonome situatie in Figuur 5.12c.



Figuur 5.11: Kwel / infiltratie zomer a. 2010 en b. 2050 W+.





Figuur 5.12: Verschil in kwel zomer a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

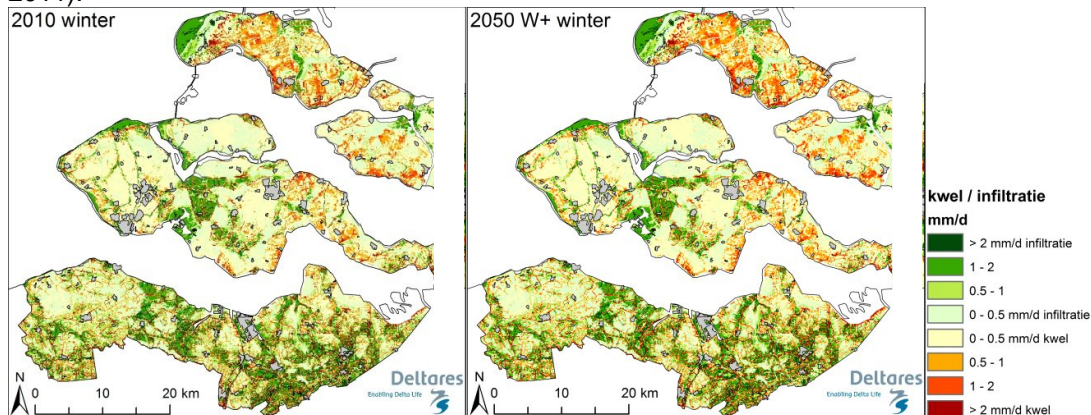
### 5.7 Kwel en infiltratie winter

Voor infiltratiegebieden is de infiltratie in de winter groter door het positieve neerslagoverschot in het winterhalfjaar. In kwelgebieden is het zomerpeil<sup>10</sup> in principe vaak hoger dan het winterpeil. Het verschil tussen de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket en het oppervlaktewaterpeil neemt dus af in de zomer ten opzichte van de winter. Als gevolg daarvan is de kweldruk in het zomerhalfjaar vaak lager dan in het winterhalfjaar; dit is te zien als Figuur 5.11a zomer wordt vergeleken met Figuur 5.13a winter). Toename van het neerslagoverschot in het winterhalfjaar in scenario W+gwa zorgt voor verhoging van de stijghoogte in het ondiepe grondwater (Figuur 5.10a). Het meeste grondwater wordt hierbij afgevoerd via het drainagesysteem van sloten en buizen. Ook de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket verandert nauwelijks (Figuur 5.6a) waardoor ook de kweldruk nauwelijks verandert (Figuur 5.14a). Zeespiegelstijging zorgt voor een toename van de kweldruk in een (smalle) zone vanaf de zee, Oosterschelde en Westerschelde (Figuur 5.14b). De resultaten van klimaatscenario W+ staan in Figuur 5.13b en Figuur 5.14c.

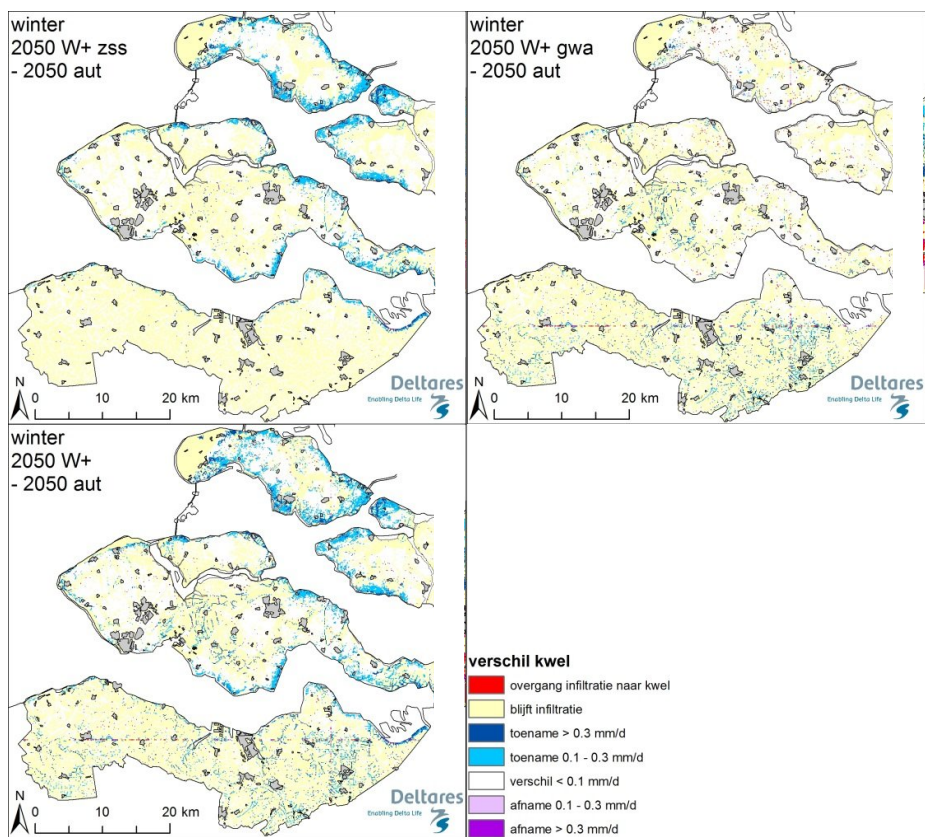
Op de schaal van een perceel, met drainage en het aanpalende slotenstelsel, geeft Figuur 1.2 goed het stromingsproces weer. De kwel verlaat het systeem met name via de sloten en enkele drains, terwijl de drains het neerslagwater opvangen, en in de zomerperiode in

<sup>10</sup> In de praktijk zou dit concept van hogere zomerpeilen in gebieden zonder watertoevoer wel eens anders kunnen uitpakken.

bepaalde mate het kwelwater. De kwel maakt dat regenwaterlenzen dun zijn (De Louw et al., 2011).



Figuur 5.13: Kwel / infiltratie winter a. 2010 en b. 2050 W+.



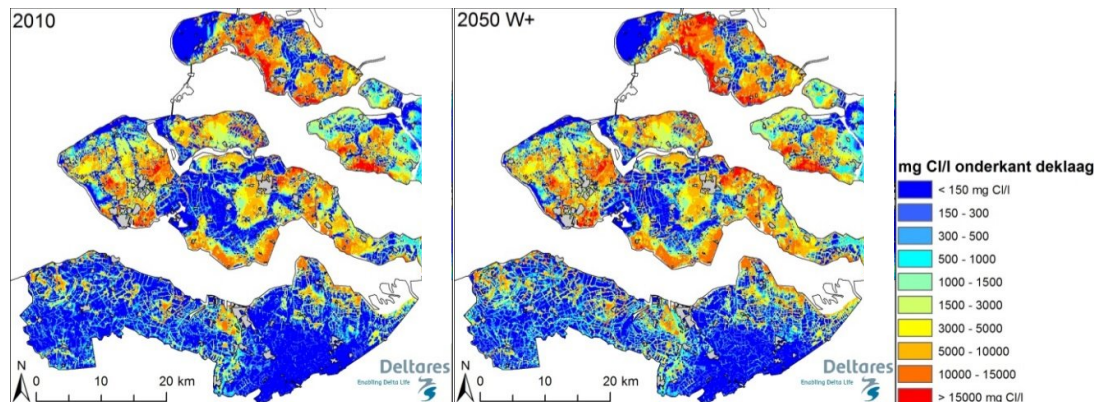
Figuur 5.14: Verschil in kwel winter a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

### 5.8 Chloride concentratie onderkant deklaag

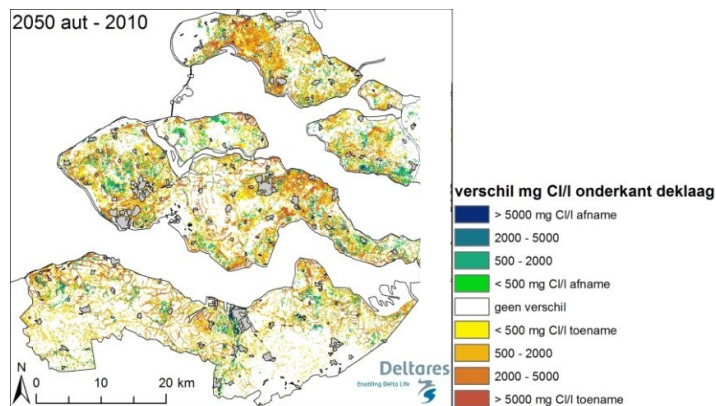
Verziltiging en verzoeting van het grondwater is een traag proces van minimaal vele tientallen jaren. De verschillen in chloride concentratie aan de onderkant van de deklaag tussen het zomer- en het winterhalfjaar zijn dan ook zeer minimaal over een relatief korte tijdschaal. Daarom wordt alleen het jaargemiddelde resultaat getoond (Figuur 5.15). Autonome verziltiging

en verzoeting vindt nog steeds plaats; metingen laten zien dat dicht op elkaar verzoeting en verzilting kan plaatsvinden (Bader, 2006). Het grondwatersysteem in Zeeland bevindt zich nog steeds niet in een dynamische evenwichtssituatie. Zo zal in kwelgebieden vaak nog verzilting van het ondiepe grondwatersysteem plaatsvinden (Figuur 5.16). Dieper brak tot zout grondwater stroomt nog steeds langzaam omhoog, dit proces is al vele tientallen jaren aan de gang. Op o.a. Walcheren, Noord-Beveland, Zuid-Beveland, Tholen en Zeeuws-Vlaanderen zijn tegelijk ook gebieden die verzoeten. Dit kan onder andere plaatsvinden op de overgang tussen poldergebieden met verschillende oppervlaktewaterpeilen. Door deze peilverschillen ontstaan in de lager gelegen polder een sterke kwel langs de rand omhoog en een sterke infiltratie in de hoger gelegen polder naar beneden. Het mee stromende brakke grondwater/zoete oppervlaktewater kan verzilting, resp. verzoeting betekenen. De huidige chloride concentratie verdeling is tevens een resultante van een grondwatersysteem waar de stromingsrichting van het grondwater over vele honderden jaren continu verandert (Delsman et al., 2014). Dit draagt bij aan een grillige zoet-brak-zout verdeling en levert zo mogelijk een bijdrage aan het heterogene voorkomen van verzoeting en verzilting in het gebied.

Door een veranderende grondwateraanvulling kan lokaal het grondwater verzoeten aan de onderkant van de deklaag (Figuur 5.17a). Door zeespiegelstijging neemt de chloride concentratie aan de onderkant van de deklaag licht toe in een kleine zone vanaf de zee, Oosterschelde en Westerschelde (Figuur 5.17b). De resultaten voor klimaatscenario W+ staan in Figuur 5.15b en Figuur 5.17c.

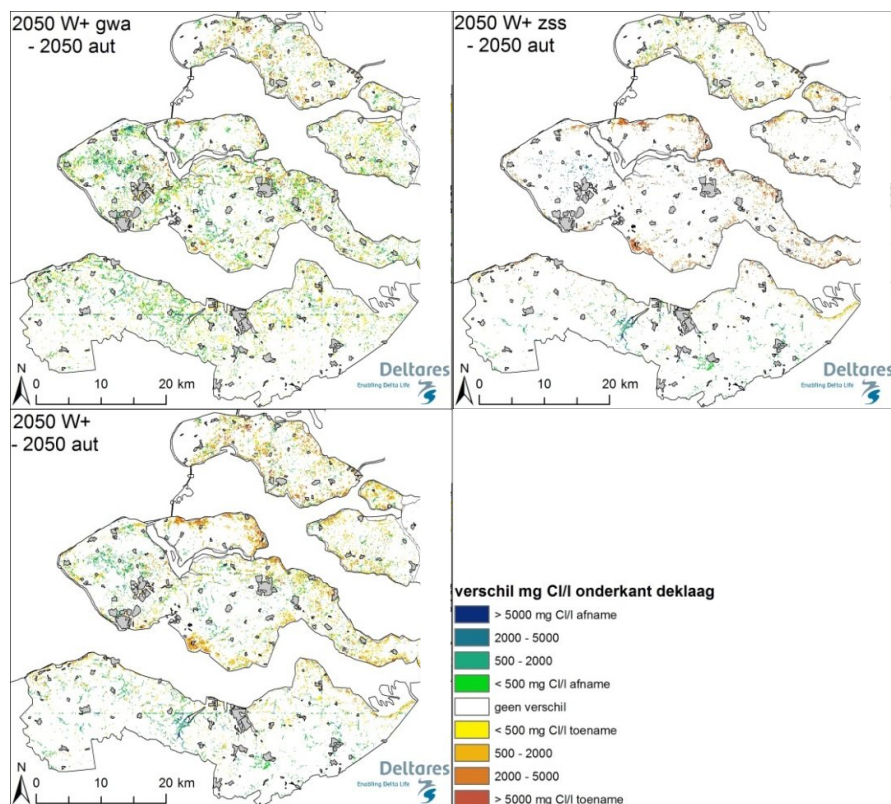


Figuur 5.15: Chloride concentratie onderkant deklaag a. 2010 en b. 2050 W+.



Figuur 5.16: Verschil in chloride concentratie onderkant deklaag autonoom 2050 – 2010.

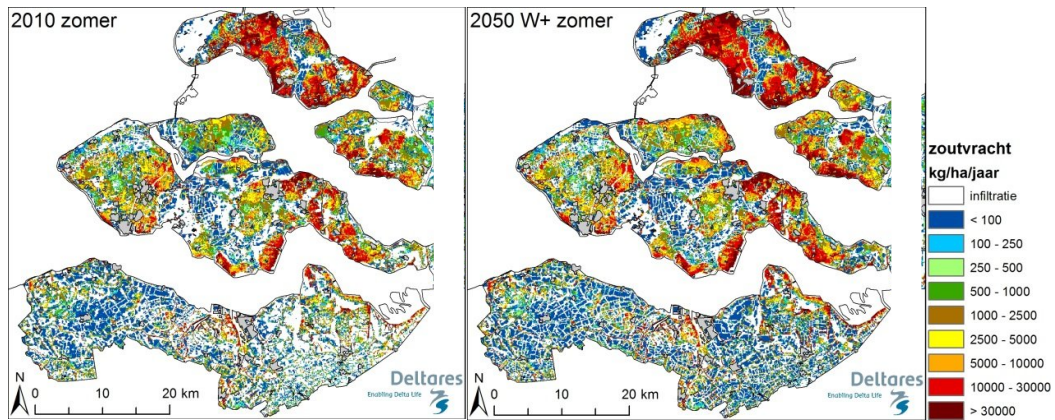




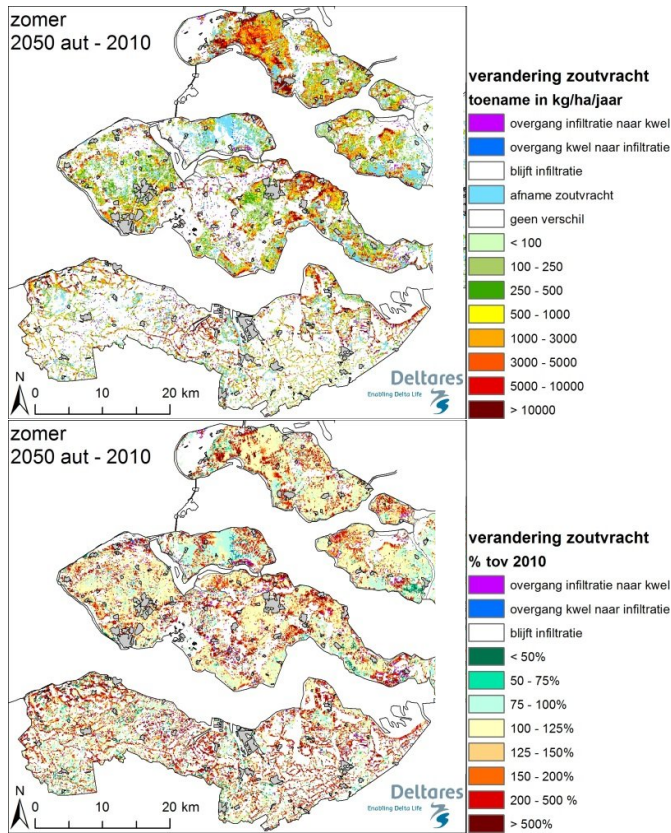
Figuur 5.17: Verskil in chloride concentratie onderkant deklaag a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

## 5.9 Zoutvracht zomer

De zoutvracht in kg/ha/jaar is vooral in de lage delen van Schouwen-Duiveland erg hoog (Figuur 5.18a). Door autonome effecten neemt de chloride concentratie onderkant deklaag en daarmee de zoutvracht overwegend toe (Figuur 5.19a) behalve in die gebieden waar de chloride concentratie onderkant deklaag afneemt (Figuur 5.16). In absolute waarden neemt de zoutvracht vooral op Schouwen-Duiveland toe (Figuur 5.19a). De zoutvracht was daar echter al hoog (Figuur 5.18a). In procenten is de toename van de zoutvracht meer verdeeld over de provincie (Figuur 5.19b). Door een lagere grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar in scenario W+gwa neemt de kwel in het zomerhalfjaar toe behalve in gebieden direct naast infiltratiegebieden, daar neemt de kwel af (Figuur 5.12a). Daarnaast neemt de chloride concentratie onderkant deklaag lokaal af (Figuur 5.17a). Dit patroon kan vertaald worden naar toename en afname van de zoutvracht voor W+gwa (Figuur 5.20a). Door zeespiegelstijging (W+zss) neemt de kweldruk in de kustzone toe waardoor de zoutvracht in deze zone toeneemt (Figuur 5.20b). De resultaten voor scenario W+ staan in Figuur 5.18b en Figuur 5.20c.

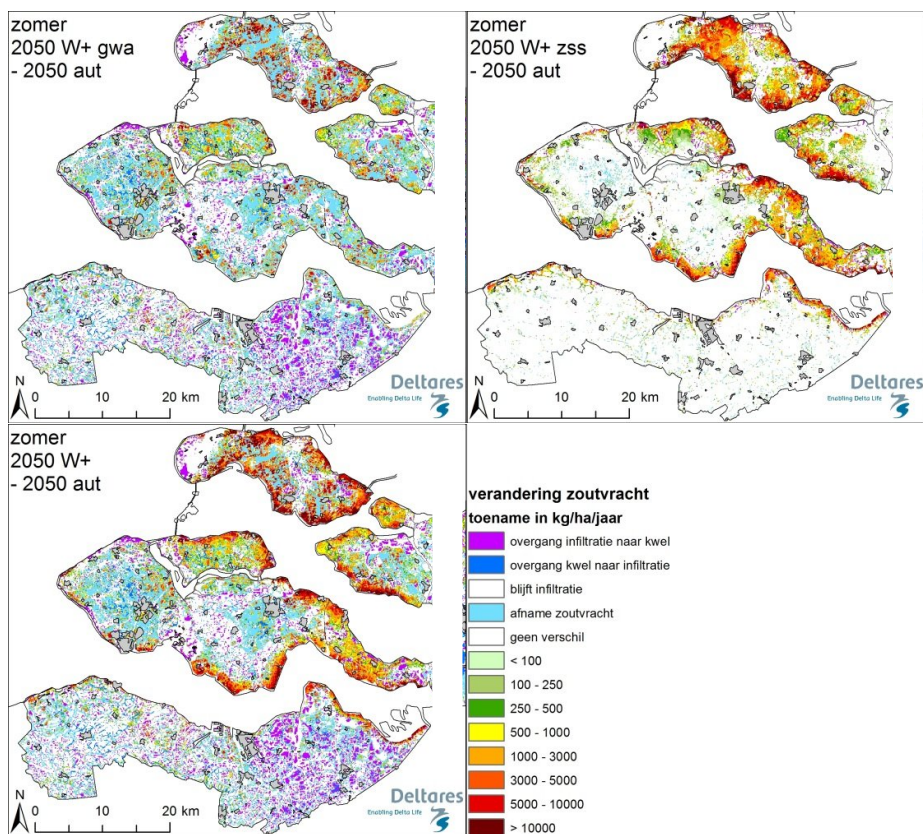


Figuur 5.18: Zoutvracht zomer a. 2010 en b. 2050 W+.



Figuur 5.19: Verschil in zoutvracht zomer, autonoom 2050 – 2010 in a. kg/ha/jaar en b. % (100% = blijft gelijk).



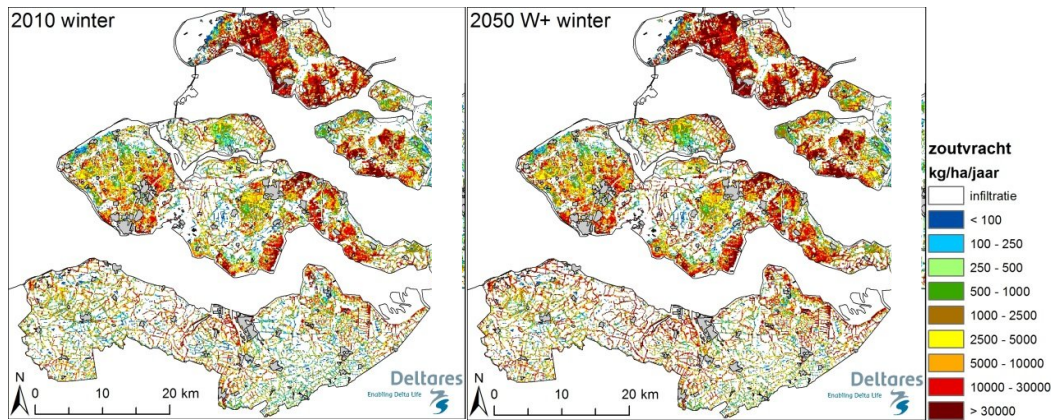


Figuur 5.20: Verschil in zoutvracht zomer a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

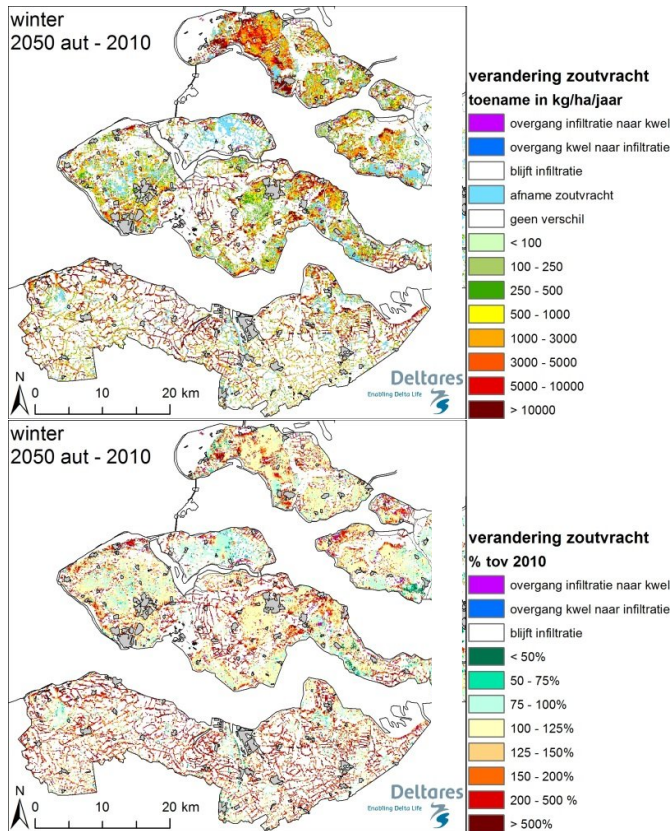
## 5.10 Zoutvracht winter

Het verschil tussen de zoutvracht in het winterhalfjaar (Figuur 5.21a) en het zomerhalfjaar (Figuur 5.18a) is slechts het verschil in kwel omdat de chloride concentratie redelijk constant blijft gedurende een jaar. In het zomerhalfjaar is de kweldruk en dus ook de zoutvracht over het algemeen lager dan in het winterhalfjaar. Door autonome processen verandert de chloride concentratie en daarom de zoutvracht. Daar waar de chloride concentratie onderkant deklaag lager wordt neemt de zoutvracht af en daar waar de chloride concentratie onderkant deklaag hoger wordt neemt de zoutvracht toe (Figuur 5.22). De kweldruk in de winter verandert nauwelijks door verandering in grondwateraanvulling (Figuur 5.14a) en slechts in de kustzone door zeespiegelstijging (Figuur 5.14b). De chloride concentratie onderkant deklaag wordt iets lager (Figuur 5.17a). De veranderingen in zoutvracht in het winterhalfjaar voor W+gwa zijn dan ook klein (Figuur 5.23a) en voor W+zss slechts groot in de kuststrook (Figuur 5.23b). De resultaten van W+ staan in Figuur 5.21a en Figuur 5.23c.

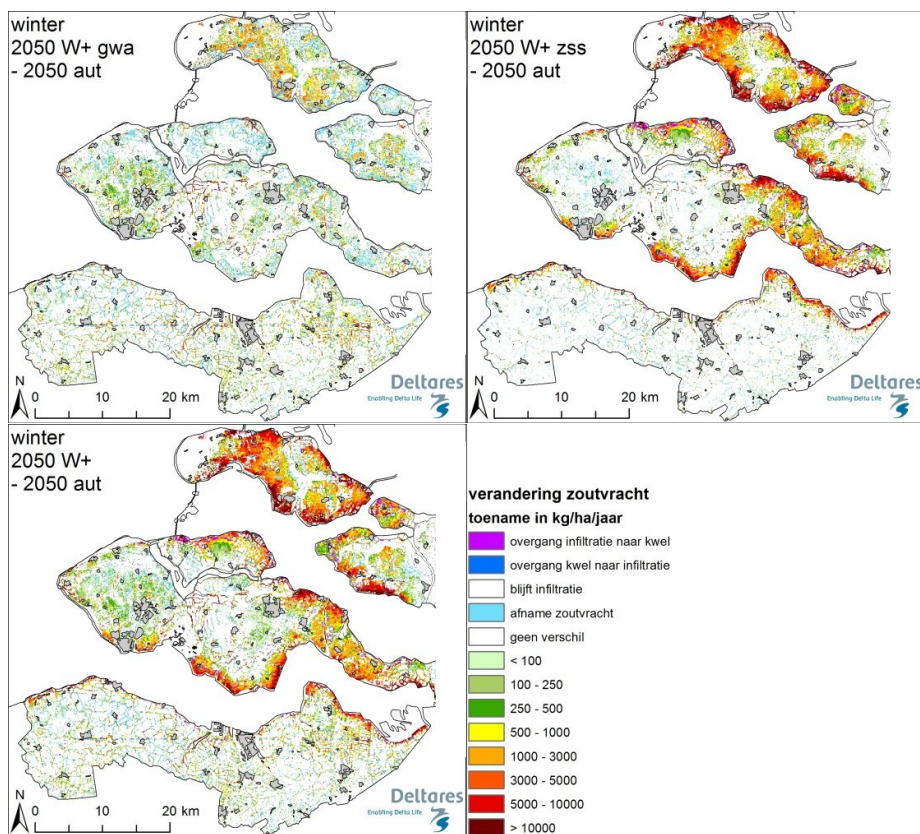
Samenvattend geeft de zoutvracht naar het oppervlaktewater systeem ruimtelijk een grillig patroon: het varieert met name per gebied en tevens in mindere mate per seizoen (in zomer minder dan in winter). De zoutvracht komt overwegend terecht in het slotenstelsel. Hoe de zoutvracht op het perceel terechtkomt in met dit regionale model lastig in het schatten. Voor de toekomst hangt de mate van toe- of afname af van de chloride concentratie aan de onderkant van de deklaag en de kweldruk. Over het algemeen neemt de zoutvracht toe; een zeespiegelstijging veroorzaakt in de kustzone nog eens een flinke extra toename.



Figuur 5.21: Zoutvracht winter a. 2010 en b. 2050 W+.



Figuur 5.22: Verschil in zoutvracht winter, autonoom 2050 – 2010 in a. kg/ha/jaar en b. % (100% = blijft gelijk).



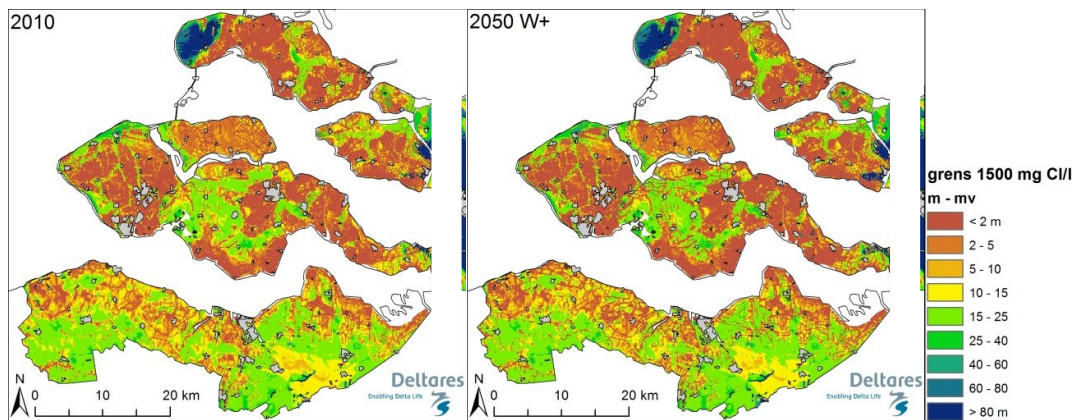
Figuur 5.23: Verschil in zoutvracht winter a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050.

## 5.11 Diepte zoet-zout grensvlak 1500 mg Cl<sup>-</sup>/l

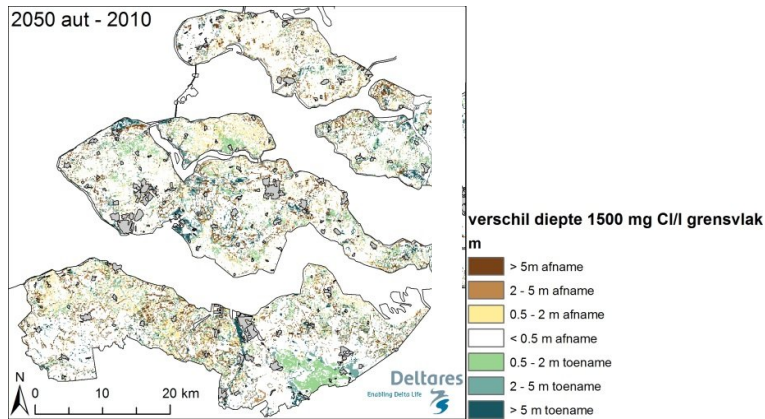
In Figuur 5.24a staat de diepte van het 1500 mg Cl<sup>-</sup>/l grensvlak weergegeven voor de huidige situatie en in Figuur 5.24b voor de situatie in 2050 voor het W+ scenario. Opgemerkt moet worden dat de chloride concentratie per modellaag uitgerekend wordt en verschillen in grensvlak dus per stapje ter grootte van de dikte van de modellagen weergegeven kunnen worden (zie paragraaf 3.3 voor de dikte van de modellagen). De toe- of afname van de diepte van het grensvlak voor de verschillende scenario's is daarom door deze keuze in modelschematisatie<sup>11</sup> niet goed zichtbaar (Figuur 5.25 en Figuur 5.26), los van het feit dat een simulatie periode van 40 jaar te kort is voor grote verschuivingen op regionale schaal (lokaal kan het sneller gaan).

<sup>11</sup> De keuze in modelschematisatie was ingegeven door de focus op het freatische grondwater, waar de dikte van de modellagen met 0.5 m klein kan worden genoemd; (veel) meer modellagen in met name het diepe deel van het grondwater system zou de reeds lange rekentijden veel langer hebben gemaakt.

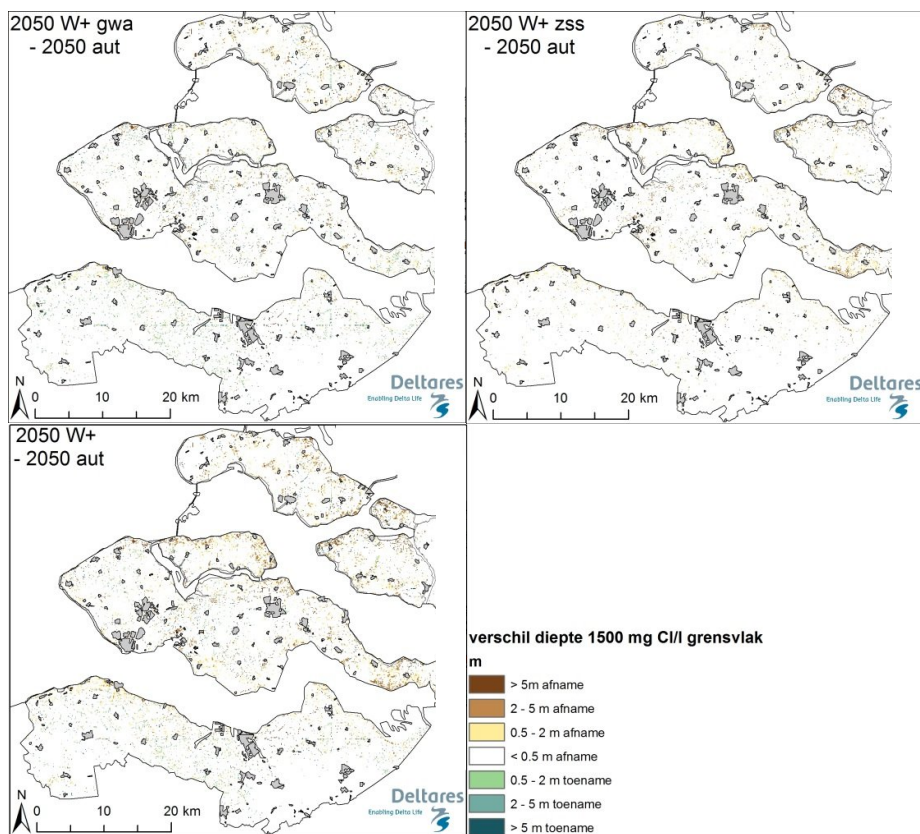




Figuur 5.24: Diepte 1500 mg Cl/l grensvlak a. 2010 en b. 2050 W+.



Figuur 5.25: Verschil in diepte 1500 mg Cl/l grensvlak, autonoom 2050 – 2010. De verplaatsing van het 1500 mg Cl/l-grensvlak is een traag proces; het verschil in grensvlak positie is over 40 jaar simulatie regelmatig kleiner dan 5m; in de figuur wordt dit dan als een wit vlak afgebeeld.

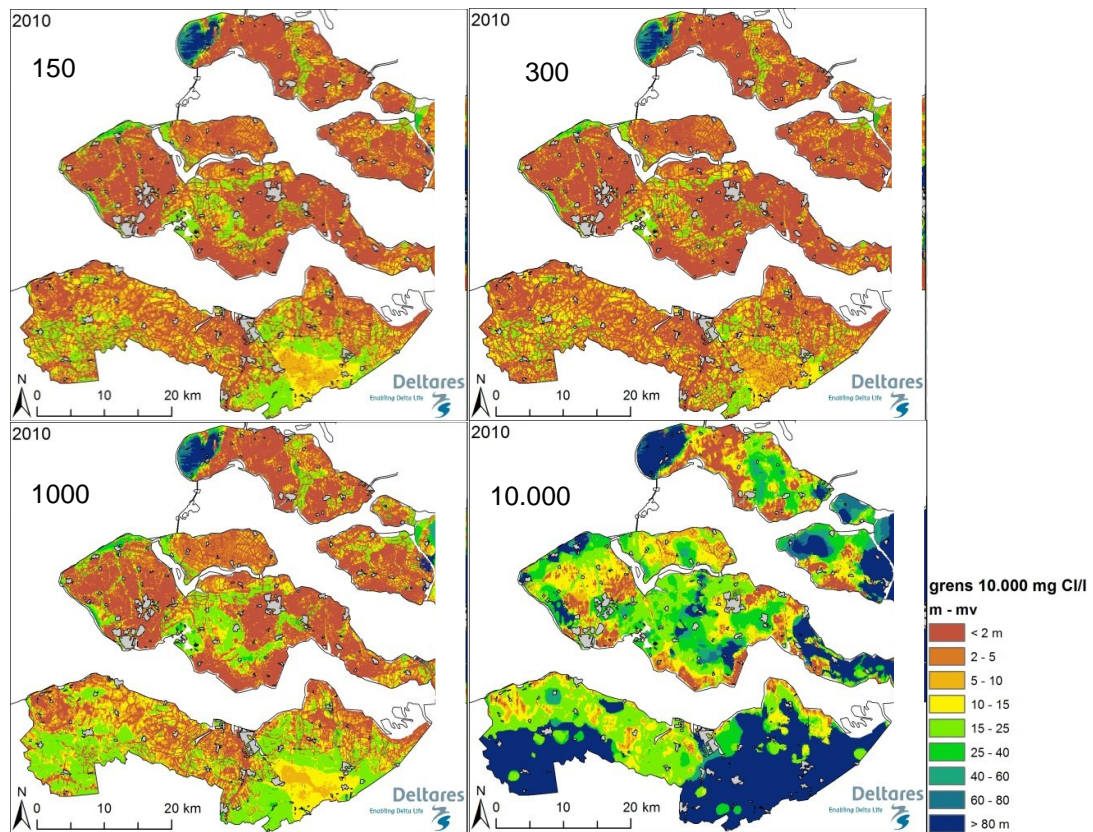


Figuur 5.26: Verschil in diepte 1500 mg Cl/l grensvlak a. W+gwa 2050 – aut 2050; b. W+zss 2050 – aut 2050 en c. W+ 2050 – aut 2050. Het verschil in grensvlak positie is over 40 jaar simulatie tussen de drie scenario's W+gwa, W+zss en W+ en het autonome scenario is meestal kleiner dan 5m; in de figuren is alleen op detailniveau iets zichtbaar.



### 5.12 Diepte grensvlak 10.000, 1000, 300 en 150 mg Cl/l

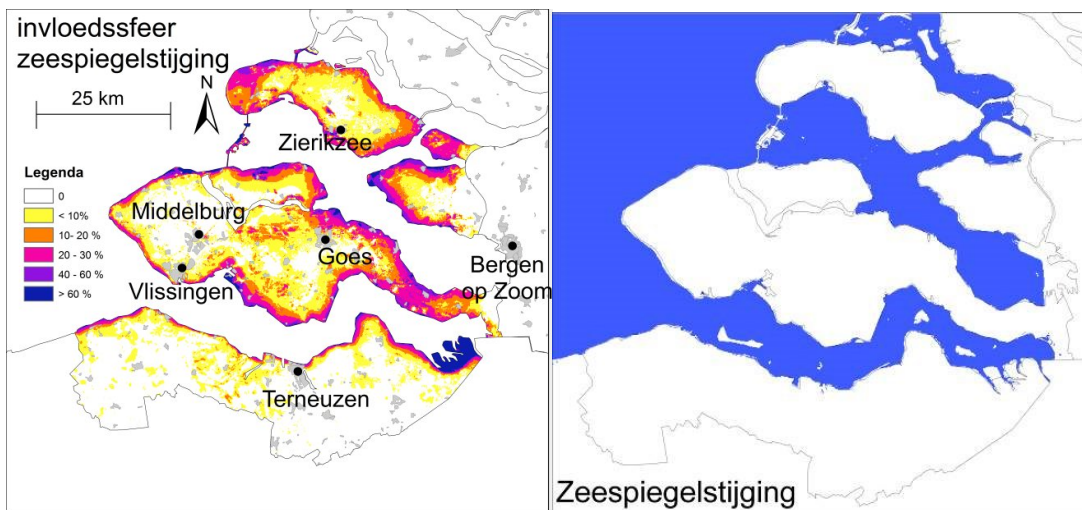
In Figuur 5.27 zijn verschillende grensvlakken (150, 300, 1000 en 10.000 mg Cl/l) weergegeven voor de huidige situatie. Omdat de verschillen tussen de autonome situatie en de verschillende scenario's beperkt zijn door de modelschematisatie zijn die figuren niet weergegeven.



Figuur 5.27: Diepte grensvlak a. 150 mg Cl/l; b. 300 mg Cl/l; c. 1000 mg Cl/l en d. 10.000 mg Cl/l.

### 5.13 Invloedsfeer van een zeespiegelstijging

De invloedssfeer van een zeespiegelstijging in het eerste watervoerend pakket is in absolute zin weer te geven in centimeters (zie Figuur 5.4b en Figuur 5.6b). Een andere insteek is om de relatieve toename in percentage van de absolute zeespiegelstijging te tonen (Figuur 5.28). Een voordeel van deze weergave is dat bij een verandering in de prognose in een zeespiegelstijging nog steeds hetzelfde resultaat kan worden gebruikt. De invloedssfeer is een resultante van bodemparameters (dikte en doorlatendheid watervoerend pakket, hydraulische weerstand Holocene deklaag).



Figuur 5.28: a. Toename van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (op -6.5 m NAP) als % van de zeespiegelstijging en b. locatie waar een stijging van het zeewaterpeil is gemodelleerd.

## 6 Equation Section (Next) Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Inleiding

Een regionaal 3D numeriek model van de stroming van zoet, brak en zout grondwater is geconstrueerd om de effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in de Provincie Zeeland te bepalen.

Het model bevat in totaal meer dan 15 miljoen modelcellen (grootte 100\*100 m<sup>2</sup>). Het model bestaat uit 40 modellagen waarbij de modellagen in het topsysteem 0.5 m dik zijn om het freatische grondwatersysteem nauwkeurig te simuleren. Het model omvat de gehele Provincie Zeeland en reikt van +6 m NAP tot -137 m NAP. De bovenkant van de Formatie van Rupel (Boomse klei) en de kleiige laagpakketten van de Formatie van Dongen vormen de geohydrologische basis en zijn als zodanig geen onderdeel van het model.

Vele typen databestanden zijn samengebracht in het numerieke model, zoals hoogtebestanden, grondwateronttrekkingen, verschillende typen oppervlaktewateren, boorgatmetingen met de karakterisatie van de ondergrond tot verschillende typen chloride concentraties. Een aantal van de databestanden bestaan uit puntmetingen (OD, zoals chloride concentratie monsters) en lijnstukken (1D, boorgatmetingen) en zijn opgeschaald naar een groter gebied, waarbij waarden voor tussenliggende gebieden geostatistisch zijn geschat.

Het regionale 3D model van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld zoet-zout transport is geijkt aan de hand van (zoetwater)stijghoogten.

Vier scenario's zijn doorgerekend waarbij gekeken wordt binnen tijdshorizon 2010-2050:

1. **aut**: de referentie case met het autonome scenario;
2. **W+zss**: het klimaatscenario W+ met alleen een zeespiegelstijging;
3. **W+gwa**: het klimaatscenario W+ met alleen een verandering in grondwateraanvulling;
4. **W+**: het klimaatscenario W+ met zeespiegelstijging én een verandering in grondwateraanvulling.

De modelresultaten bestaan uit veranderingen in stijghoogte, grondwaterstand, infiltratie en kwel en infiltratiefluxen, zoutvracht en de 3D zoet-brak-zout verdeling van het grondwater.

### 6.2 Conclusies

#### Modeltechnische conclusies

- Het toepassingsbereik van het model en de modelresultaten betreft de regionale schaal. Lokale vraagstukken zoals opkegeling onder onttrekkingsputten of de een verandering in zoutvracht naar de bouwvoor van een landbouwperceel als gevolg van klimaatverandering kunnen niet beantwoord worden. Hiertoe dienen lokale modellen uit het regionale model te worden geknipt, en is verfijning van hydrogeologische parameters en additionele metingen noodzakelijk.
- Drie stappen zijn nodig om de huidige 3D chloride concentratie verdeling te bepalen: a. creëren van een ruimtelijke verdeling van alle beschikbare metingen (chloride concentratie metingen, VES-metingen en boorgatmetingen), b. toevoegen van de twee 2D zoet-brak (150 mg Cl<sup>-</sup>/l) en brak-zout (1000 mg Cl<sup>-</sup>/l) grensvlakken uit de TNO-studie zoet-zout REGIS (Goes and Vernes, 2010), en c. gebruik maken van het numerieke

grondwaterstromingsmodel als interpolator om numerieke instabiliteiten in de zoet-brak-zout verdeling te verwijderen. Het resultaat is een 3D zoet-brak-zout verdeling waarin bijvoorbeeld de zoete regenwaterlenzen onder kreekruggen –karakteristiek voor Zeeland– kunnen worden geïdentificeerd.

- De conclusie is dat de gemodelleerde zoetwaterstijghoogten de gemeten waarden goed benaderen. Tijdens de ijking is de mediane waarde van de residuen teruggebracht in alle vijf de deelgebieden, met een maximale waarde van 0.17m. De aanpak heeft tevens geleid tot een betrouwbaarder model, ondanks dat de gemiddelde absolute residuen naar slechts maximaal 0.35 m zijn teruggebracht.
- De (toekomstige) grondwateraanvulling is moeilijk te bepalen aan de hand van KNMI06-scenario's. Bij de KNMI14-scenario's is dat overigens niet wezenlijk anders (Klein Tank et al., 2015).

### Fysische conclusies

- Aan de hand van vele kaarten zijn de effecten beschreven van zeespiegelstijging en een verandering in de grondwateraanvulling op het grondwatersysteem van de Provincie Zeeland over de periode 2010-2050, voor zowel de zomer- als de winterperiode.
- De resultaten van een viertal scenario's zijn geanalyseerd aan de hand van de volgende aspecten:
  - **stijghoogte eerste watervoerend pakket:**  
in de zomer zorgt een kleinere grondwateraanvulling voor een verlaging van de stijghoogte, met name in de duinen. In de winter zal in gebieden met drainage de afvoer van water toenemen maar de stijghoogte zal nauwelijks veranderen; in gebieden zonder drainage (duinen) neemt de stijghoogte wel toe. In de zone vanaf de zee zorgt een zeespiegelstijging echter voor een toename van de stijghoogte.
  - **grondwaterstand**  
de kleinere grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar zorgt voor een significante verlaging van de grondwaterstand in de meeste gebieden, maar in het winterhalfjaar zal de grondwaterstand nauwelijks toenemen en alleen slechts in die gebieden (zonder drainage) waar het water niet direct wordt afgevoerd. De zeespiegelstijging zorgt slecht lokaal voor een beperkte verhoging van de grondwaterstand; significant minder dan het effect van een zeespiegelstijging op de stijghoogte wegens de aanwezigheid van de Holocene deklaag.
  - **kwel en infiltratie fluxen**  
over het algemeen neemt in het zomerhalfjaar de kwel toe in de kwelgebieden. De grondwateraanvulling neemt af en dientengevolge verlaagt de grondwaterstand. Omdat de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket minder afneemt dan de grondwaterstand neemt de kwel toe. In de kwelgebieden direct naast infiltratiegebieden (waar minder grondwateraanvulling plaatsvindt) zal de kwel echter ietwat afnemen. In de winter is het effect op de kwel en infiltratie fluxen significant minder. Weliswaar neemt het neerslagoverschot flink toe maar dit overschot wordt grotendeels (direct) afgevoerd via het drainagesysteem van sloten en buizen. Een zeespiegelstijging zorgt in een (smalle) zone vanaf de zee, Oosterschelde en Westerschelde wel voor een (kleine) toename van de kweldruk.
  - **chloride concentratie onderkant deklaag (jaargemiddeld)**  
de zoet-brak-zout verdeling in het grondwatersysteem bevindt zich nog steeds niet in een dynamische evenwichtssituatie. Zowel verzilting als verzoeting van het ondiepe grondwater vindt plaats in de Provincie Zeeland, en kan op korte afstand van plaats tot plaats sterk verschillen. De oorzaak van deze heterogene ruimtelijke verdeling van verzoeting en verzilting heeft onder andere te maken met ruimtelijke verschillen in verticale grondwaterstroming veroorzaakt door verschillen in oppervlaktewaterpeilen

tussen aanpalende poldergebieden. Bovendien varieert de zoet-brak-zout verdeling in het ondiepe grondwatersysteem lokaal ook nog eens behoorlijk. Het effect van een zeespiegelstijging of een verandering in grondwateraanvulling is klein ten opzichte van het autonome verziltings- en verzoetingsproces. Over het algemeen vindt er meer verzilting dan verzoeting plaats.

- **zoutvracht**  
de zoutvracht (een combinatie van kweldruk en chloride concentratie onderkant deklaag) neemt overwegend toe, in absolute zin het meeste vooral op Schouwen-Duiveland, maar in procenten is de toename van de zoutvracht meer verdeeld over de provincie.
- **diepte vijftal grensvlakken (1500, 10.000, 1000, 300 en 150 mg Cl<sup>-</sup>/l)**  
de toe- of afname van de diepte van de grensvlakken is op een regionale schaal voor de verschillende scenario's op een tijdschaal van 40 jaar (2010-2050) niet groot (orde van enkele meters). Met de gekozen verticale modelschematisatie is dit echter niet goed te identificeren.
- **invloedssfeer van een zeespiegelstijging in het eerste watervoerend pakket**  
de invloedssfeer van een zeespiegelstijging op het grondwatersysteem van de Provincie Zeeland is beperkt tot de eerste honderden meters tot enkele kilometers vanuit de kustlijn. In het noorden van de provincie is de invloedssfeer iets groter dan het zuiden, omdat de dikte van het watervoerend pakket tot de geohydrologische basis in het zuiden kleiner is.

### 6.3 Aanbevelingen

- Het in deze rapportage beschreven model is het Zeeland model versie 1.0. Het verdient aanbeveling het modelinstrument regelmatig te actualiseren en te verbeteren. Het betreft bijvoorbeeld de volgende onderdelen:
  - nieuwe data, bijv.
    - provinciedekkend AHN op 0.5\*0.5 m<sup>2</sup> schaal,
    - geologie met GEOTOP (voxels van 100\*100\*0.5m<sup>3</sup>) schematiseren in plaats van met REGIS Zeeland. De complexe ondergrond kan binnen GEOTOP met behulp van meerdere realisaties worden weergegeven,
    - 3D zoet-brak-zout verdeling in het grondwater uit het FRESHEM programma, zie Bijlage 8B, pagina 84) implementeren in Zeeland model. Het is tevens interessant om de grensvlakken uit de 3D zoet-brak-zout kartering van het onderzoeksprogramma FRESHEM te vergelijken met de grensvlakken uit Figuur 5.27.
    - toevoegen betere schatting zoet-brak-zout verdeling in de ondergrond van het buitenwater (bijv. Westerschelde en Oosterschelde),
    - recentere onttrekkingsdata uit het Landelijk Grondwater Register,
    - nieuwe waterpeilen polders of buitenwater,
    - nieuwe chloride concentraties oppervlaktewater,
    - het Kanaal door Zuid-Beveland dat loopt van Hansweert (bij de Westerschelde) naar Wemeldinge (bij de Oosterschelde) zit niet in het TOP10-vector bestand en is nu niet in het model meegenomen. De breedte is gemiddeld 24 m en de diepte 6.75 – 7.50 m,
    - de Schelde die eindigt in de Westerschelde bij de Belgische grens zit niet in het TOP10-vector bestand of de oppervlaktewater shapes.
    - in het Markiezaatsmeer is de chloride concentratie waarschijnlijk eerder 2400 mg Cl<sup>-</sup>/l dan 300 mg Cl<sup>-</sup>/l.
  - nieuwe inzichten en concepten, bijv.



- verbeterde ondiepe zoet-brak-zout verdeling in regenwaterlens gebieden naar aanleiding van promotieonderzoek Perry de Louw (WUR/VU, Deltares programma Kennis als Vermogen), De Louw (2013),
  - toevoegen extra schijnbare weerstanden ('*conductance*') tussen het oppervlaktewater en het grondwatersysteem in grote modelcellen naar aanleiding van promotieonderzoek van Pieter Pauw (WUR, Kennis voor Klimaat project Climate Proof Fresh Water Supply, thema 2), Pauw et al. (2014), Pauw (2015),
  - verbeterde levering dynamische zoutvracht naar de landbouwpercelen, drains en het oppervlaktewater naar aanleiding van promotieonderzoek Joost Delsman (VU, Kennis voor Klimaat project Climate Proof Fresh Water Supply, thema 2), Delsman (2015),
  - verbeteren van het regionale Zeeland model voor een aantal lokale situaties zoals het duingebied van Schouwen-Duiveland.
- Omzetten van het Zeeland model naar de computer code iMOD-SEAWAT (binnenkort Open Source). SEAWAT is de meest gebruikte code in de wereld om dichtheidsgedreven grondwaterstroming en gekoppeld zout transport te modelleren, is vrij toegankelijk en ondersteunt de nieuwste MODFLOW pakketten. Hierdoor kan modelinvoer effectief worden aangemaakt en modeluitvoer snel worden gevisualiseerd en geanalyseerd, zowel in kaartbeelden als in tijdseries of profielen. iMOD-SEAWAT is in de loop van 2017 geparallelliseerd om lange rekentijden te minimaliseren.
  - Doorvertalen van de resultaten van het regionale model naar effect op landbouw/bouwvoor schaal. In het model wordt de zoutvracht naar het oppervlaktewater systeem op een 100\*100m<sup>2</sup> per seizoen gemodelleerd. De zoutvracht komt overwegend terecht in het slotenstelsel. Hoe de zoutvracht op het perceel terechtkomt over het jaar verdeeld bij een variabel neerslagoverschot is met dit regionale model niet direct in het schatten.
  - Doorrekenen van extra scenario's zoals het aanbrengen van technische waterbeheersmaatregelen op regionale schaal met aandacht voor effecten op het regionale grondwatersysteem. Te denken valt aan de grootschalige realisatie van ondergrondse wateropslag systemen zoals de GO-FRESH pilots.

## 7 Literatuur

- van Baaren, E. S., Doornenbal, P. and de Louw, P. G. B.: Vastleggen nul-situatie zoet-brak- zout grondwater Kanaal Gent Terneuzen, Deltares rapport 1208359., 2014.
- van Baaren, E. S., De Louw, P. G. B., Faneca Sánchez, M., de Vries, B., van der Vleuten, J., Massink, H. and Heringa, J.: Hydrologische studie Kustlaboratorium., 2012.
- Bader, E.: Verziltings- en verzoetingsprocessen in Nederland; met speciale aandacht voor de Wieringermeerpolder., 2006.
- Van Bakel, P. J. T. and Stuyt, L. C. P. M.: Updating the knowledge of the salt tolerance of crops, based on literature review, expert knowledge and practical experiences (in Dutch), Alterra-rapport 2201 Alterra, Wageningen, The Netherlands., 2011.
- Bear, J.: Hydraulics of groundwater., 1979.
- Beijk, V.: Klimaatverandering en verzilting; Modelstudie naar de effecten van de KNMI "06 klimaatscenario's" op de verzilting van het hoofwatersysteem in het noordelijk deltabekken., 2008.
- Buma, J. T., Oude Essink, G. H. P. and de Louw, P. G. B.: Monitoringsplan Perkpolder en omgeving, Deltares-rapport 2008-U-R0513/B., 2008a.
- Buma, J. T., Oude Essink, G. H. P. and de Louw, P. G. B.: Monitoringsplan Waterdunen en omgeving, Deltares-rapport 2008-U-R0511/B., 2008b.
- Delsman, J. R.: Saline groundwater – surface water interaction in coastal lowlands, Vrije Universiteit Amsterdam., 2015.
- Delsman, J. R., Hu-A-Ng, K. R. M., Vos, P. C. C., De Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Stuyfzand, P. J. and Bierkens, M. F. P.: Paleo-modeling of coastal saltwater intrusion during the Holocene: an application to the Netherlands, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(10), 3891–3905, doi:10.5194/hess-18-3891-2014, 2014.
- Doherty, J.: PEST Model-Independent Parameter Estimation (Users Manual). Watermark Numerical Computing., 2005.
- Faneca Sánchez, M., Gunnink, J. L., van Baaren, E. S., Oude Essink, G. H. P., Auken, E., Elderhorst, W. and de Louw, P. G. B.: Modelling climate change effects on a Dutch coastal groundwater system using airborne electromagnetic measurements, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(12), 4499–4516, doi:10.5194/hess-16-4499-2012, 2012.
- Faneca Sánchez, M. and Oude Essink, G. H. P.: Effecten van een zouter Kanaal Gent-Terneuzen op het grondwater systeem., 2015.
- Goes, B. J. M., Oude Essink, G. H. P., Vernes, R. W. and Sergi, F.: Estimating the depth of fresh and brackish groundwater in a predominantly saline region using geophysical and hydrological methods, Zeeland, the Netherlands, *Near Surf. Geophys.*, 7, 401–412, 2009.
- Goes, B. J. M. and Vernes, R. W.: REGIS Zeeland, Deelrapport C: Zoet, brak en zout grondwater., 2010.
- Haasnoot, M., Vermulst, J. A. P. H. and Middelkoop, H.: Impact of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands., 1999.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. and McDonald, M. G.: MODFLOW-2000 User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 00-92, 121 p., 2000.
- Harbaugh, A. W. and McDonald, M. G.: A modular Three-Dimensional Finite- Difference Ground-Water Flow Model. Book 6. Chapter A1. Techniques of Waterresources Investigations of the United States Geological Survey., 1988.
- Harbo, M. S., Pedersen, J., Johnsen, R. and Petersen, K.: Groundwater in a future climate., 2011.
- Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., van den Hurk, B. and Lenderink, G.: KNMI'14 Klimaatscenario's voor Nederland., 2015.
- Kloosterman, F. H.: Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite., 2007.
- KNMI: KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands., 2006.
- Konikow, L. F., Goode, D. J. and Hornberger, G. Z.: A Three- Dimensional Method-of-Characteristics Solute-Transport Model (MOC3D); U.S. Geol. Surv. Water-Resources Investig. Rep., 96–4267, 87 p, 1996.
- de Kraker, A. M. J.: Flooding in river mouths: human caused or natural events? Five centuries of flooding

- events in the SW Netherlands, 1500–2000, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(6), 2673–2684, doi:10.5194/hess-19-2673-2015, 2015.
- Kuijper, M. J. M., Oude Essink, G. H. P., Binsbergen, R. and Minnema, B.: Klimaatverandering en verzilting in Zuid-Holland in beeld gebracht, *H2O*, 8, 29–33, 2005.
- De Lange, W. J., Prinsen, G. F., Hoogewoud, J. C., Veldhuizen, A. A., Verkaik, J., Oude Essink, G. H. P., van Walsum, P. E. V., Delsman, J. R., Hunink, J. C., Massop, H. T. L. and Kroon, T.: An operational, multi-scale, multi-model system for consensus-based, integrated water management and policy analysis: The Netherlands Hydrological Instrument., *Environ. Model. Softw.*, 59, 98–108, doi:10.1016/j.envsoft.2014.05.009, 2014.
- Langevin, C. D., Thorne, D. T. J., Dausman, A. M., Sukop, M. C. and Guo, W.: SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport., 2008.
- Lebbe, L. C., Oude Essink, G. H. P., Janssen, G. M. C. M., Courtens, C. and Vandenbohede, A.: SCALDWIN: Analyse grensoverschrijdende verzilting grondwater in het poldergebied van de provincies Oost-Vlaanderen, West-Vlaanderen en Zeeland., 2012.
- De Louw, P. G. B.: Saline seepage in deltaic areas, *Vrije Universiteit Amsterdam.*, 2013.
- De Louw, P. G. B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B. R., Gunnink, J. L., Van Baaren, E. S. and Oude Essink, G. H. P.: Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(12), 3659–3678, doi:10.5194/hess-15-3659-2011, 2011.
- De Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Eeman, S., van Baaren, E. S., Vermue, E., Delsman, J. R., Pauw, P. S., Siemon, B., Gunnink, J. L. and Post, V. E. A.: Dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden, *Landschap*, 32(1), 5–15, 2015.
- Massop, H. T. L.: Landelijke karakterisering buisdrainage., 2002.
- Minnema, B., Kuiper, M. J. M., Oude Essink, G. H. P. and Maas, C.: Bepaling toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland., 2004.
- Oude Essink, G. H. P.: Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de Kop van Noord-Holland, *Stromingen*, 6(3), 9–21, 2000.
- Oude Essink, G. H. P.: Density Dependent Groundwater Flow - (Salt Water Intrusion and Heat Transport)., 2001a.
- Oude Essink, G. H. P.: Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in The Netherlands: A Numerical Study, *Transp. Porous Media*, 43, 137–158, 2001b.
- Oude Essink, G. H. P.: Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, *H2O*, 19(1), 60–64, 2007.
- Oude Essink, G. H. P., van Baaren, E. S., De Lange, W. J. and De Wit, A.: Beschouwing van de effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op het grondwatersysteem., 2008a.
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S. and De Louw, P. G. B.: Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 46(May), 1–16, doi:10.1029/2009WR008719, 2010.
- Oude Essink, G. H. P., van Baaren, E. S. and Van Vliet, M.: Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, *Deltares 2008-U-R0322/A.*, 2008b.
- Oude Essink, G. H. P., Houtman, H. and Goes, B. J. M.: Chloride-concentratie onderkant deklaag in Nederland., 2005.
- Oude Essink, G. H. P., de Louw, P. G. B., Stevens, S., de Veen, B., Prevo, C., Marconi, V. and Goes, B.: Voorkomen en dynamiek van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland - resultaten van een verkennende en provinciedekkende meetcampagne., 2009.
- Oude Essink, G. H. P. and Verkaik, J.: NHI zoet-zout: grondwater in het Nederlandse kustgebied., 2010.
- Pauw, P. S.: Field and Model Investigations of Freshwater Lenses in Coastal Aquifers, *Wageningen University.*, 2015.
- Pauw, P. S., Van Baaren, E. S., Visser, M., De Louw, P. G. B. and Oude Essink, G. H. P.: Increasing a freshwater lens below a creek ridge using a controlled artificial recharge and drainage system: a case study in the Netherlands, *Hydrogeol. J.*, doi:10.1007/s10040-015-1264-z, 2015.
- Pauw, P. S., De Louw, P. G. B. and Oude Essink, G. H. P.: Groundwater salinisation in the Wadden Sea area of the Netherlands: quantifying the effects of climate change, sea-level rise and anthropogenic interferences, *Netherlands J. Geosci. - Geol. en Mijnb.*, 91–3, 373–383, 2012.
- Pauw, P. S., van der Zee, S. E. A. T. M., Leijnse, A., Delsman, J. R., De Louw, P. G. B., De Lange, W. J. and Oude Essink, G. H. P.: Low-Resolution Modeling of Dense Drainage Networks in Confining Layers., *Ground*

- Water, 1–11, doi:10.1111/gwat.12273, 2014.
- Pauw, P. S., van der Zee, S. E. A. T. M., Leijnse, A. and Oude Essink, G. H. P.: Saltwater upconing due to cyclic pumping by horizontal wells in freshwater lenses, *Groundwater*, 54(4), 521–531, doi:10.1111/gwat.12382, 2016.
- Pebesma, E.: Threedimensional interpolation of subsurface chloride concentrations in the Netherlands., 2009.
- Van de Plassche, O.: Sea-level change and water-level movements in the Netherlands during the Holocene, VU University Amsterdam, Netherlands., 1982.
- Post, V. E. A., Kooi, H. and Simmons, C. T.: Using hydraulic head measurements in variable-density ground water flow analyses., *Ground Water*, 45(6), 664–71, doi:10.1111/j.1745-6584.2007.00339.x, 2007.
- Regionaal Bestuurlijk Overleg Schelde: Karakterisering stroomgebied Schelde., 2004.
- Rijkswaterstaat: Stroomgebiedbeheerplan Schelde., 2009.
- Santing, G.: Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten, *H2O*, 13(22), 544–548, 1980.
- Schultz, B.: Waterbeheersing van de Nederlandse droogmakerijen., 1992.
- Snepvangers, J. J. J. C. and Berendrecht, W. L.: MIPWA–Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer.TNO rapport 2007-U-R0972/A. TNO: Utrecht. Tóth., 2007.
- Sommeijer, M. J.: Identifying suitable measures to enlarge fresh groundwater reserves on a regional scale. A feasibility study in Walcheren, the Netherlands., 2013.
- Sommeijer, M. J., Pauw, P. S., van Baaren, E. S. and Oude Essink, G. H. P.: Zeeland kan voorraden zoet grondwater vergroten, *Land+Water*, 2013.
- Stafleu, J., Maljers, D., Gunnink, J. L. and Menkovic, A.: 3D Subsurface modelling of Zeeland, *Front. Shallow Subsurf. Technol.*, 20–23, 2010.
- Stafleu, J., Maljers, D., Gunnink, J. L., Menkovic, A. and Busschers, F. S.: 3D modelling of the shallow subsurface of Zeeland, the Netherlands, *Netherlands J. Geosci. - Geol. en Mijnb.*, 90(4), 293–310, 2011.
- Stuyfzand, P. J.: Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands, *Vrije Universiteit, Amsterdam.*, 1993.
- Stuyt, L. C. P. M., Blom-Zandstra, M. and Kselik, R. A. L.: Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens, *Rapport 2739.*, 2016.
- Stuyt, L. C. P. M. and Rijk, J.: Transitie en toekomst van Deltalandbouw, *Indicatoren voor de ontwikkeling van de land- en tuinbouw in de Zuidwestelijke Delta van Nederland.*, 2006.
- TNO-IGG: Inleiding in geofysisch boorgatmeten, een praktische cursus voor grondwater onderzoek., 1992.
- Todd, D. K.: *Groundwater Hydrology*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York., 1980.
- Van De Ven, G. P.: *Man-made lowlands: history of water management and land reclamation in the Netherlands*, Uitg. Matrijs, Utrecht, Netherlands, 293 [online] Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0027722761&partnerID=tZOtx3y1>, 1993.
- Vernes, R. W., Hummelman, H. J. and Menkovic, A.: REGIS Zeeland, *Deelrapport B: Hydrogeologische opbouw en hydraulische eigenschappen van Holocene afzettingen.*, 2010.
- Voortman, B.: *De invloed van gebiedseigenschappen en klimaatverandering op de dikte en vorm van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland.*, 2010.
- Vos, P. P. C.: *Origin of the Dutch coastal landscapes*, Utrecht University., 2015.
- De Vries, A., Veraart, J., De Vries, I., Oude Essink, G. H. P., Zwolsman, G., Creusen, R. and Buijtenhek, H.: *Vraag en aanbod van zoetwater in de Zuidwestelijke Delta.*, 2009.
- Van Vugt, A., Oude Essink, G. H. P. and Biesheuvel, A.: *Modellering van het zoet – zout grondwatersysteem op Texel, Stromingen*, 9, 33–46, 2003.
- Werkgroep Grondwater KRW Schelde: *Beschrijving grondwaterlichamen Scheldestroomgebied.*, 2008.
- Zuurbier, K. G.: *Increasing freshwater recovery upon aquifer storage: A field and modelling study of dedicated aquifer storage and recovery configurations in brackish-saline aquifers.*, 2016.
- Zuurbier, K. G., Kooiman, J. W., Groen, M. M. A., Maas, B. and Stuyfzand, P. J.: *Enabling successful aquifer storage and recovery (ASR) of freshwater using horizontal directional drilled wells (HDDWs) in coastal aquifers*, , 1, 1–24, doi:10.1017/CBO9781107415324.004, 2015.





## 8 Bijlagen

### A Definities zoet-brak-zout grondwater

#### Zoet, brak of zout

De classificatie van het zoutgehalte van water hangt af van de perceptie van de gebruiker. Hier worden dan ook verschillende indelingen voor gehanteerd. De indeling van Stuyfzand is gerelateerd aan drinkwater. Zo is de grens direct gerelateerd aan de streefwaarde voor grondwater en is de grens tussen zoet en brak ingegeven door de smaakgrens van water. De indeling van Wamelink en Runhaar is gerelateerd aan de vegetatietypen op basis van het ecotopensysteem.

Klassen (eenheid mg/l)	Stuyfzand (1993)	Wamelink & Runhaar (2000)
Zeer zoet (oligosaline)	0 – 5	0 – 150
Zeer zoet - zoet	5 – 30	-
Zoet	30 – 150	150 – 300
Zoet - brak	150 – 300	300 – 1000
Brak	300 – 1000	1000 – 3000
Brak – zout	1000 – 10000	5000 – 10000
Zout	10000 – 20000	> 10000
Hypersaline	> 20000	

In Zeeland is de term *landbouwkundig zoet* geïntroduceerd, zijnde 1000 mg Cl-/l als grens tussen zoet en brak grondwater. In deze rapportage wordt uitgegaan van de volgende definities voor zoet, brak en zout grondwater:

- Zoet: <1000 mg Cl-/l
- Brak: 1000 – 3000 mg Cl-/l
- Zout: >3000 mg Cl-/l

Daarnaast wordt ook vaak de grens van 150 mg Cl-/l getoond om aan te geven waar volgens alle definities het zoete water aanwezig is.

#### De grootte van de zoutvracht

De grootte van de zoutvracht van het grondwater naar het oppervlaktewater is de grootte van de kwel flux door de deklaag vermenigvuldigd met de concentratie chloride aan de onderkant van de deklaag.

#### Interne verzilting

Met interne verzilting wordt bedoeld dat zowel het grondwater als het oppervlaktewater verzilt onder invloed van steeds zoutere kwel. Het grondwater in het laaggelegen kustgebied dat nu naar boven komt, is afkomstig uit zoute en brakke mariene lagen en is in de ondergrond achtergebleven toen de zee zich uit dit deel van ons land terugtrok. De zoutconcentraties in het ondiepe grondwater zullen toenemen, ook zonder klimaatverandering of zeespiegelstijging, omdat het autonome interne verziltingsproces, hoewel het al eeuwen geleden op gang kwam, nog lang niet is uitgewerkt. De stijging van de zeespiegel in combinatie met een lagere rivierafvoer in de zomer vormt de voornaamste oorzaak van het oprukken van de zogenaamde zouttong in met name de Nieuwe Waterweg. Dit mechanisme van verzilting van het hoofdsysteem wordt externe verzilting genoemd.

## B Gerelateerde zoet-zout studies

Op het gebied van zoet-zout grondwater zijn door Deltares al verschillende studies uitgevoerd op nationaal en regionaal niveau. Hieronder volgt een beschrijving van een aantal door Deltares eerder verrichte studies, waarvan een aantal zich richt op grondwater in het kustgebied en het effect van veranderingen in neerslag- en verdampingspatronen en zeespiegelstijging ten gevolge van klimaatverandering.

### 1. Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland

Opdrachtgever: Provincie Zuid-Holland

Tijdshorizon: vanaf 2004-2010

Voor de Provincie Zuid-Holland is een studie uitgevoerd naar de veranderingen binnen zoete grondwaterlichamen onder invloed van autonome ontwikkelingen, zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering. Een 3D numeriek dichtheidsafhankelijk grondwater model (cellen 250\*250 m<sup>2</sup>: ~9500 km<sup>2</sup>) is gemaakt om de effecten van menselijk ingrijpen, zoals het effect van brijnlozingen in het tweede watervoerend pakket en landaanwinningen voor de kust, te kwantificeren.

- *Kuijper, M., Oude Essink, G.H.P., Binsbergen, R., van & B. Minnema 2005, Kijkje in de toekomst: klimaatveranderingen en verzilting in de provincie Zuid-Holland in beeld gebracht, H2O (8) 33-37.*
- *Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P. 2004. Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.*
- *Oude Essink, G.H.P., Baaren, E., van & Vliet, M. van, 2008, Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, Deltares-rapport 2008-U-R0322/A, 60 p.*
- *Oude Essink, G.H.P., E.S. van Baaren, and P.G.B. de Louw (2010), Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, Water Resour. Res., 46, W00F04, doi:10.1029/2009WR008719.*

### 2. Kwalitatieve beschouwing van de effecten van een zout Volkerak Zoommeer op het grondwatersysteem

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Waterdienst

Tijdshorizon: vanaf 2008

In dit onderzoek wordt een kwalitatieve beschrijving gegeven over de mogelijke invloed van een ander waterpeilbeheer op de landbouw rondom het Volkerak-Zoommeer. De analyse in dit rapport spitst zich in eerste instantie toe op de veranderingen in het grondwatersysteem, zowel wat betreft de waterkwantiteit (kwel en infiltratie) als de waterkwaliteit (zoute kwel naar landbouwpercelen en zoutbelasting naar oppervlaktewater).

- *Oude Essink, G.H.P., Baaren, E., van, Lange, W. de & Wit, A. de, 2008, Beschouwing van de effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op het grondwatersysteem, 2008-U-R0774/A, 83 p.*

### 3. Monitoringsplannen voor Waterdunen en Perkpolder

Opdrachtgever: Provincie Zeeland

Tijdshorizon: vanaf 2008

De Provincie Zeeland heeft Deltares opdracht gegeven voor het opstellen van een monitoringsplan in het kader van de plannen 'Waterdunen' en 'Perkpolder'. De plannen behelzen onder meer het creëren van een getijdengebied en een zoetwaternatuurgebied in wat nu nog binnendijs landbouwgebied is, ten westen van Breskens. Het doel van de monitoring is om ongewenste, aan het watersysteem gerelateerde effecten zoals vernatting en verzilting te signaleren, zodat tijdig maatregelen kunnen worden genomen.

- *Buma, J.T., Oude Essink, G.H.P. & Louw, P.G.B., de, 2008, Monitoringsplan Waterdunen en omgeving, 2008-U-R0511/B, 37 p.*
- *Buma, J.T., Oude Essink, G.H.P. & Louw, P.G.B., de, 2008, Monitoringsplan Perkpolder en omgeving, 2008-U-R0513/B, 34 p.*

#### **4. CLIWAT, Interreg IV, CLimate change in relation to WATer quantity and quality**

Oprachtgever: Interreg IV-B

Tijdshorizon: vanaf 2008-2011

Partners: in Nederland: TNO, Deltares, Vitens, Wetterskip Fryslan, Provincie Friesland.

Interreg IV CliWat: on determining the effects of climate change on groundwater systems

In dit project wordt de invloed van klimaatsveranderingen op het grondwatersysteem onderzocht, zowel wat betreft kwantiteits- als kwaliteitsaspecten. In het CLIWAT project worden de resultaten van het TNO GIP-project Topintegraal gebruikt voor de geologische modellering. Verder is het effect van de geologie op de modellering van zouttransport in de Zeeuwse Delta en Noord-Nederland in kaart gebracht.

- [www.cliwat.eu](http://www.cliwat.eu)
- Poster: zie <http://freshsalt.deltares.nl>

#### **5. Zoet-zout Nationaal Hydrologisch Instrumentarium**

Oprachtgever: Rijkswaterstaat

Tijdshorizon: vanaf 2009-2010

Een casco NHI zoet-zout modelinstrumentarium (cellen 250\*250 m<sup>2</sup>: geheel laag Nederland ~25000 km<sup>2</sup>) is ontwikkeld waarmee de gevolgen van klimaatverandering (KNMI'06 scenario's), bodemdaling en zeespiegelstijging worden gekwantificeerd. Daarnaast de effecten van bovenstaande processen ook de mogelijke effecten kunnen worden geschat van peilbeheer (bijv. IJsselmeer) en de haalbaarheid van grootschalige oplossingsstrategieën.

- *Verkaik, J., Hunink, J. Baaren, E.S., van, Delsman J. and Oude Essink, G.H.P., 2010. Netherlands Hydrological modelling Instrument for fresh and saline groundwater in the Dutch coastal zone. Proceedings 21<sup>nd</sup> SWIM, Azores, Portugal.*
- Poster: zie <http://zoetzout.deltares.nl>

#### **6. Duurzaamheidsverkenning Nederland (Kwadijk et al., 2007)**

Oprachtgever: PBL

Tijdshorizon: vanaf 2007

Deltares heeft een verkennend onderzoek uitgevoerd om een eerste beoordeling van de ernst van de problemen te geven in geval van een stijging van de zeespiegel (op lange termijn) van 1, 2, 4 en 6 meter. Het onderzoek richt zich op de gevolgen van de verhoging van de stijghoogte in de watervoerende pakketten, de toename van de kwel voor het waterbezwaar in polders, de toename van het zoutgehalte in het oppervlaktewater (vanuit het grondwater), de stijgende waterstanden op de rivieren, de verder landinwaartse zoutindringing op de rivieren en de toename van het opbarstingsrisico van de bodem. In deze oriënterende studie is, o.a. aan de hand van een numerieke modellering (cellen 1\*1km<sup>2</sup>: geheel laag Nederland), naar voren gekomen dat niet zozeer overstroming vanuit zee het grote probleem is, maar dat stagnerende rivierafvoeren (door wegvallen vrij verval) en de toenemende kweldruk in vooral West Nederland (door toenemend risico opbarsten bodem) de belangrijkste problemen kunnen gaan worden.

- *Kwadijk, J., Vuren, van, S. Verhoeven, G., Oude Essink, G., Snepvangers, J. & Calle, E. 2007, Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding, i.o.v. Milieu en Natuurplan Bureau, Deltares-rapport, Q4394, 73 p.*
- *Oude Essink, G.H.P., 2007, Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied, H2O, nr 19, 60-64.*
- *Oude Essink, G.H.P., Baaren, E.S., van. 2009. Verziltig van het Nederlandse Grondwatersysteem, Deltares 2009-U-R91001, 24 p.*

## 7. De Waterhouderij

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat (WINN)

Tijdshorizon: vanaf 2010

Partners: InnovatieNetwerk, Deltares

In dit samenwerkingsproject De Waterhouderij van LNV-RWS (Deltares/Waterdienst/InnovatieNetwerk/Aequator) wordt onderzocht of het haalbaar is om in deelgebieden in de winter water te bergen en in de zomer (tijdens droge groeiseizoenen) het geborgen water te leveren aan verschillende gebruiksfuncties (landbouw, fruitteelt, visvijvers, etc.). Deltares levert: 1. kennis betreffende (effecten op) het grond- en oppervlaktewatersysteem, 2. mogelijke ondergrondse oplossingen zoals grondwater berging onder kreekruggen en 3. de organisatie van het opzetten van een pilotstudie. Case op Walcheren en in 2011 mogelijk op Schouwen-Duiveland.

## 8. Climate Proof Areas

Opdrachtgever: Interreg IV-B

Partners: o.a. Provincie Zeeland (trekker) en Rijkswaterstaat.

Tijdshorizon: 2009-2011

In 2009 is dit Interreg project met Schouwen-Duiveland als pilot van start gegaan. CPA heeft een sterke focus op het gebied van klimaatsverandering en duurzaamheid. In CPA is met de stakeholders (provincies, gemeente, RWS, MKB en bewoners) een begin gemaakt met de verkenning welke wensen er zijn voor kwaliteitsverbetering van het gebied en de relatie tot de duurzaamheid op langere termijn, waarbij veiligheid, klimaatbestendigheid en optimaal gebruik van bodem- en watersystemen aan de orde komen.

## 9. Wellenreductie studie

Opdrachtgever: Hoogheemraadschap van Rijnland

Het Hoogheemraadschap van Rijnland brengt verschillende beleidsopties met betrekking tot watervoorziening (met name verziltingsbestrijding en eutrofiëringsproblematiek) in beeld. De opties lopen uiteen van heroverweging van het huidige inlaat/doorspoelbeleid, het accepteren van optredende verzilting tot aan actieve bestrijding van bronnen. Hiertoe zijn verschillende technieken beschikbaar, waarvan de efficiëntie en de effecten nog onduidelijk zijn. In de Achtergrondstudie Kwelreductietechnieken worden een aantal technieken voor kwelreductie in beeld gebracht, met speciale aandacht voor welreductie. De doelstelling is het in beeld brengen van de (globale) effecten van diverse methoden om kwel te reduceren.

- Louw, P. de, Oude Essink, G.H.P. en Maljaars, P. 2007: *Achtergrondstudie kwelreductietechnieken*, TNO rapport 2007-U-R0357/B, 82 p., april 2007.

## 10. Verzilting grondwatersysteem Wetterskip Fryslan

Opdrachtgever: Wetterskip Fryslan

Met behulp van een modelinstrumentarium wordt duidelijkheid geschapen over een aantal effecten van peilveranderingen op wateroverlast, drainagecapaciteit, en met name verzilting in het kustgebied van het Wetterskip Fryslân. Hierbij wordt gekeken naar deelaspecten van de verziltingproblematiek, zoals verzilting van het sloot- en grondwater en zoute kwel. Tevens worden de modellen gebruikt om verschillende inrichtingsvarianten te analyseren.

- *Wetterskip Fryslân, Arcadis en TNO. 2005. Bodemdaling Barradeel II, Inrichtingsplan.*
- Louw, P. de & Oude Essink, G.H.P., 2005, *Verzilting grondwatersysteem Wetterskip Fryslan, i.s.m. Arcadis, TNO-rapport 2006-U-R0152/A, 29p.*
- Louw, P. de, Oude Essink, G.H.P., Maljaars P. en Wils, R.A., 2006, *Monitoring verzilting Dongeradeel, TNO rapport 2006-U-R0177/B, 57 p., november 2006.*
- Oude Essink, G.H.P. & Louw, P.G.M., 2006. *Kwalitatieve beschouwing over de invloed van zoute kwel op de landbouw bij peilwijziging op het Lauwersmeer, TNO rapport 2006-U-R0152/A, 17 p.*

### 11. Pilot zoetwaterverkenning Zuidwestelijke Delta

Oprachtgevers: Nationaal Delta Programma, Zuidwestelijke Delta

Partners: Rijkswaterstaat en Deltares.

Binnen het project "Pilot zoetwaterverkenning ZW-delta" (onderdeel van Nationaal Delta Programma, regionale Zoetwatervoorziening, Deelprogramma Zuidwestelijke Delta) wordt de huidige en toekomstige vraag- en aanbod van oppervlakte- en grondwater in de Zuidwestelijke Delta geanalyseerd, en wel voor specifiek drie deelgebieden: Goeree-Overflakkee, West-Brabant en Tholen / St. Philipsland. Doelstellingen zijn: het ondersteunen van schattingen van de toekomstige zoetwatervraag in Nederland bij klimaatverandering, zeespiegelstijging en autonome (interne) verzilting, en het vergelijken van modelresultaten interactie GW-OW op verschillende schaalniveaus (landelijk-regionaal-lokaal) voor Tholen en St. Philipsland.

### 12. Climate Proof Fresh Water Supply (Kennis voor Klimaat Thema 2, Zoetwatervoorziening)

Oprachtgever: KvK, in samenwerking met KvK 'hot-spots'.

Partners: Deltares, WUR/Alterra, KWR, TNO, VU, UT, TUD, UU, Acacia Water

Tijdshorizon: 2010-2014

Het project Climate Proof Fresh Water Supply heeft als doel: het bijdragen aan het vinden van robuuste, flexibele en lange-termijn oplossingen voor de zoetwatervoorziening van Nederland op verschillende ruimteschalen in een veranderende Delta. De zes werkpakketten zijn:

- WP1: Klimaatverandering in Nederland in Europees perspectief – onze randvoorwaarden
- WP2: Opslag in gecombineerd oppervlak- en grondwater en regenwaterlenzen
- WP3: Aanpassing functies onder beperking van zoetwater
- WP4: Water technologie
- WP5: Besluitvorming onder onzekerheid
- WP6: Integratie Cases (Zuidwestelijke Delta, Haaglanden en Groene Ruggengraat)

Deltares is consortiumtrekker en trekker van WP2, met twee promotieonderzoeken, met cases in Zuid-Beveland, Het Westland en De Groene Ruggengraat, maar opgedane kennis over haalbaarheid kan opgeschaald worden.

#### 12-a. Promotie onderzoek Joost Delsman (Uitwisseling zoet-zout grondwater en oppervlaktewater tijdens droge perioden)

*Delsman, J.R. 2015, Saline groundwater - surface water interaction in coastal lowlands, VU University Amsterdam, Amsterdam, 194 pp.*

Partners: Deltares, VU

Tijdshorizon: 2010-2014

De ruimtelijke en temporele dynamiek van de uitwisseling tussen brak/zout grondwater en oppervlaktewater is nog slecht begrepen. Zeker in perioden van droogte is verzilting van het oppervlaktewater een probleem, dat in het huidige waterbeheer veelal wordt opgelost door doorspoelen met het toch al schaarse zoete water. In de toekomst staat deze beheerspraktijk onder druk, door de combinatie van een toenemende watervraag en afnemende waterbeschikbaarheid door klimaatverandering. Het promotieonderzoek onderzoekt de uitwisseling tussen brak/zout grondwater en oppervlaktewater door middel van veldmetingen en modelonderzoek. Het onderzoekt de mogelijke gevolgen van klimaatverandering en de effectiviteit van eventuele oplossingsrichtingen.



**12-b. Promotie onderzoek Pieter Pauw (zoetwatervoorraden in het grondwater onder klimaatverandering)**

*Pauw, P.S. 2015. Field and Model Investigations of Freshwater Lenses in Coastal Aquifers, PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, 168 pp.*

Partners: Deltares, WUR

Tijdshorizon: 2010-2014

Dit onderzoek richt zich op de zoetwatervoorraad in neerslaglenzen onder druk van klimaatverandering. Centraal staat het laten toenemen van de lokale beschikbaarheid van zoet water door het creëren van een robuust en flexibel buffersysteem om zoet water in de ondergrond in regenwaterlenzen op lokale schaal te bergen. Het project concentreert zich op de toekomstige kwetsbaarheid van zoetwaterlenzen op drie verschillende niveaus: 1. kleine lenzen op landbouwpercelen, 2. medium lenzen op kreekruggen en 3. grote lenzen onder duingebieden (gebruikt voor drinkwaterwinning). Het zoete grondwater in deze lenzen kunnen belangrijk zijn voor zelfvoorzienendheid van een regio onder toekomstige zoute en droge omstandigheden.

**13. Promotie onderzoek Perry de Louw (wellen en regenwaterlenzen):**

*De Louw, P.G.B. 2013. Saline seepage in deltaic areas. Preferential groundwater discharge through boils and interactions between thin rainwater lenses and upward saline seepage. PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, ISBN/EAN 9789461085429.*

Partners: Deltares, WUR, VU

Tijdshorizon: 2008-2013

In deze studie worden de ondiepe brakwatersystemen in Nederland getypeerd en wordt het risico van de huidige en toekomstige verzilting bepaald. Verder worden de bepalende factoren voor de dynamiek van regenwaterlenzen vastgesteld. Met intensieve metingen (o.a. stijghoogten, chloride, bodemvocht) en modelberekeningen wordt meer inzicht verkregen in de dynamiek van regenwaterlenzen als gevolg neerslag en verdamping en de factoren die de hoedanigheid van de lenzen bepalen. Dit procesinzicht helpt te anticiperen op toekomstige ontwikkelingen zoals ontpoldering, peilveranderingen, bodemdaling, klimaatverandering en zeespiegelstijging die de zoetwaterbeschikbaarheid aantasten. Daarnaast is in de Zuidwestelijke Delta onderzoek gedaan naar het vóórkomen en dynamiek van dunne regenwaterlenzen onder landbouwpercelen in zoute kwelgebieden. Zoute kwel voorkomt indringing van regenwater waardoor de regenwaterlenzen heel dun zijn (< 2.0 m). Op de meeste locaties werd zelfs niet eens zoet grondwater aangetroffen en was het zoute kwelwater al doorgedrongen tot in de onverzadigde zone.

**14. Scaldwin, transboundary zoet-zout grondwaterstromingsmodel Vlaanderen**

Opdrachtgever: Provincie Zeeland en Vlaamse Milieu Maatschappij

Tijdshorizon: 2011-voorjaar 2012

Opdrachtgever: Provincie Zeeland en Vlaamse Milieu Maatschappij

Tijdshorizon: 2011-voorjaar 2012

In deze Interreg studie wordt het grensoverschrijdende verzilting grondwater in het poldergebied van de provincies Oost-Vlaanderen, West-Vlaanderen en Zeeland geanalyseerd. De Universiteit Gent en Deltares hebben een 3D numeriek grondwaterinstrumentarium ontwikkeld dat de zoet-brak-zout verdeling in het grondwater van de laatste 1000 jaar heeft gereconstrueerd. Het zal worden ingezet om toekomstige waterhuishoudkundige vraagstukken als verzilting grond- en oppervlakte water, effecten klimaatverandering en effecten maatregelen te analyseren.

## 15. Nationaal Modellen en Data Centrum: van Kritische Zone tot Kritische Onzekerheden

Partners: Deltares, TNO, WUR, KNMI, PBL

Tijdshorizon: 2011-voorjaar 2012

In dit project wordt met verschillende kennisinstituten samengewerkt om onzekerheden rond data, modelconcepten en klimaatverandering te analyseren en methodes te ontwikkelen om deze nader kwantitatief en kwalitatief in kaart te brengen. In de Case Walcheren zullen de verschillende onzekerheden in geologie (doorlatendheden watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen), hydrologie (numeriek zoet-zout instrumentarium: weerstanden waterlopen, dispersie, initiële zoet-brak-zout verdeling), meteorologie (neergeschaalde KNMI06 scenario's) en ecologie (gewasgroei, zoutschade, aardappelen) samengebracht worden in een 'modellentrein' en doorgerekend worden, waarbij de grootste onzekerheden 'boven zouden moeten komen drijven'

## 16. Het Kustlaboratorium

Tijdshorizon: 2011-voorjaar 2012

Het Kustlaboratorium van Het Zeeuwse Landschap (Burghsluis, Schouwen-Duiveland) brengt duurzame voedselvoorziening (aquacultuur) en landschaps- en natuurontwikkeling samen in één plan: het creëren van een zoute polder (voor natuur, productie en recreatie) in een relatief zoete omgeving. Binnen dit onderzoek is een 3D modelinstrumentarium voor grondwaterstroming en zouttransport ontwikkeld van het (geplande) Kustlaboratorium en de relevante omgeving. Dit instrument wordt gebruikt voor onderzoek naar effecten van aanpassingen in de gebiedsinrichting op de hydrogeologie. Het instrument maakt het mogelijk dat deze effecten kunnen worden voorspeld en gekwantificeerd ter ondersteuning van de inrichting van het Kustlaboratorium en voor de toetsing van het ontwerp en zijn varianten. Ter vergroting van de betrouwbaarheid van dit instrumentarium en voor een verder begrip van het hydro(geo)logische systeem is een monitoringscampagne uitgevoerd.

## 17. GO-FRESH

Partners: Deltares, KWR Water Research, Alterra, Acacia Water, HZ University of Applied Science, ZLTO

Tijdshorizon: 2013-2017

GO-FRESH (staat voor Geohydrological Opportunities FRESH water supply, [www.go-fresh.info](http://www.go-fresh.info)) is een Kennis voor Klimaat project in de Zuidwestelijke Delta. Een consortium bestaande uit Deltares (trekker), Alterra, KWR, Acacia Water en HZ University of Applied Sciences onderzoekt in hoeverre lokale maatregelen de zoetwaterbeschikbaarheid voor de landbouw kunnen vergroten in gebieden die onafhankelijk zijn van het hoofdwatersysteem. Hierbij wordt de ondergrond gebruikt voor opslag van zoet water in periodes van wateroverschot, om het water vervolgens te gebruiken in droge tijden. Dit project richt zich op twee typen gebieden die door klimaatverandering waarschijnlijk sneller onder druk komen te staan in termen van zoetwaterbeschikbaarheid: a. gebieden met kreekruggen met een wat diepere zoetwaterlens en b. lager gelegen gebieden met zoute kwel en dientengevolge dunne regenwaterlenzen. Binnen GO-FRESH zijn drie maatregelen gestart:

- 1) Kreekrug Infiltratie Proef: toename zoetwatervoorraad in een kreekrug door verhoging van de grondwaterstand via peilgestuurde drainage in combinatie met infiltratie van oppervlaktewater,
- 2) Freshmaker: toename zoetwatervoorraad in een kreekrug door injectie zoet water én onttrekking zout grondwater via horizontale putten,
- 3) Drains2Buffer: vergroten/behouden zoetwatervoorraad van dunne regenwaterlenzen door diepe drainage, waarmee brak tot zout grondwater wordt afgevangen.

In de eerste twee maatregelen is de dikte van de zoetwaterlens flink gegroeid; op de proeflocaties kan droogteschade worden voorkomen. De derde maatregel laat een ietwat dikkere regenwaterlens zien, maar de meetperiode is niet lang genoeg geweest om te onderscheiden of lens is gegroeid als direct gevolg van de maatregel of als onderdeel van de natuurlijke variabiliteit van het weer.

#### **18. FRESHM Zeeland**

Partners: Deltares, TNO, BGR

Tijdshorizon: 2014-2018

FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland - FRESHM is een groot onderzoeksprogramma van Deltares, TNO en BGR. Met behulp van een helikopter wordt de zoet-brak-zoutverdeling van het Zeeuwse grondwater met behulp van elektromagnetische metingen in kaart gebracht. Inmiddels zijn voor de gehele provincie de metingen vanuit de helikopter uitgevoerd. Deltares, TNO en BGR ontwikkelen een aanpak om deze ruwe data te vertalen naar een 3D zoet-brak-zout verdeling van het grondwater. Begin 2017 is alle data beschikbaar.

<https://www.zeeland.nl/water/zoet-water/zoet-zoutverdeling-zeeuwse-ondergrond>

#### **19. Rapid regional mapping of salt-fresh water distributions (project STW Water Nexus)**

Partners: Universiteit Utrecht, Deltares, Fugro, Shell, Eijkelkamp

Tijdshorizon: 2015-2019

In this scientific research project 1.1.1, the goal is to develop and apply data-assimilation methods to optimally combine a variable-density groundwater flow and coupled salt transport model with airborne geophysical data and in-situ observations to jointly estimate the regional fresh-salt water distribution and hydrogeological properties. Research steps are:

- 3D mapping of groundwater salinity distributions and hydraulic subsoil properties using airborne geophysical mapping. Initial mapping capabilities will be improved by an estimation of uncertainty and using joint-inversion with hydrogeological model results.
- cross-validation to investigate the relation between mapping accuracy and available (in situ) data.

## C Parameteraanpassingen tijdens kalibratie

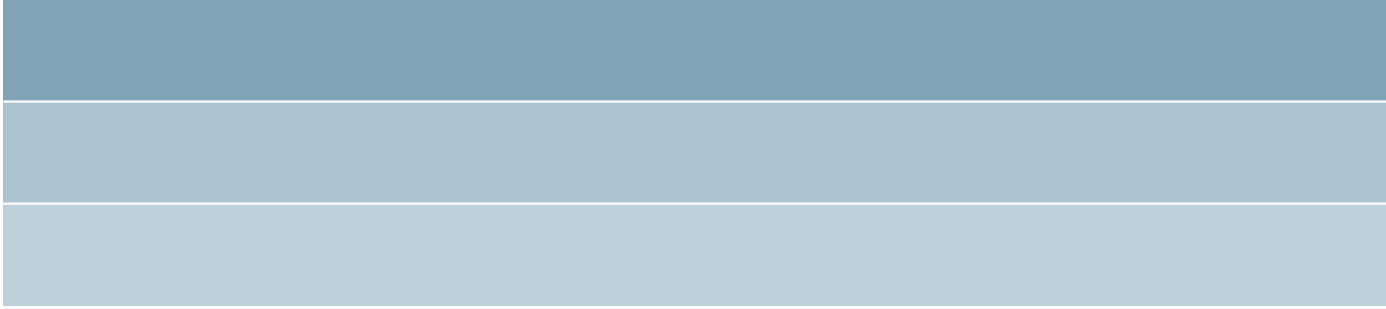
Tabel 8.1 A priori en a posteriori parameterwaarden en aanpassingsfactoren per parameter per deelgebied. F = aanpassingsfactor t.o.v. initiële (a priori) parameterwaarde.

Parameter	Deel- gebied:	Schouwe- Duiveland/ Goere- Overflakkee	F	Walcheren/ Noord- Beveland	F	Tholen-St. Philipsland	F	Zuid- Beveland	F	Zeeuw- Vlaanderen	F
		Gecalibr. waarde		Gecalibr. waarde		Gecalibr. waarde		Gecalibr. waarde		Gecalibr. waarde	
nascz1	1.48E+01	4.93	0.33								
nazaz1	9.30E+00	9.83	1.06								
nawak1	3.63E-02	0.04	1.14	0.12	3.21	0.02	0.46	0.02	0.46	0.03	0.77
nawaz2	1.90E+00	1.25	0.66	2.55	1.35	1.89	1.00	3.28	1.73	5.69	3.00
nawak2	3.63E-02						0.00	0.05	1.29		
nawaz3	1.90E+00	1.36	0.72	1.95	1.03	2.30	1.21	4.36	2.30	5.69	3.00
nihov1	4.65E-02	0.03	0.72	0.06	1.36	0.10	2.16	0.03	0.58	0.05	1.02
nawok1	5.19E-02	0.14	2.66	0.02	0.38	0.17	3.23	0.06	1.08	0.05	1.02
nascz2	1.48E+01	16.74	1.13								
nawoz2	2.31E+00	4.78	2.07	1.07	0.46	2.58	1.12	1.57	0.68		
bxz1	9.42E+00									10.86	1.15
nazaz2	9.30E+00	13.62	1.47								
bxk1	5.85E-02									0.05	0.92
bxz2	9.25E+00	15.91	1.72	5.52	0.60	3.24	0.35	7.75	0.84	6.17	0.67
nawok2	5.19E-02	0.06	1.07								
wak0	2.07E-02					0.02	0.77				
nawoz3	2.31E+00	3.94	1.70								
bxz3	9.25E+00	12.18	1.32					3.79	0.41	6.07	0.66
eez1	1.04E+01	11.38	1.09							10.65	1.02
eez2	1.05E+01	9.56	0.91							12.21	1.16
eez3	1.05E+01	6.19	0.59							13.05	1.24
pzwaz2	8.84E+00	26.53	3.00	7.83	0.89	5.50	0.62	4.36	0.49		
wak1	1.89E-02	0.02	1.17	0.02	1.25	0.03	1.56	0.01	0.67		
krz5	1.39E+01	41.63	3.00								
krz6	1.39E+01	28.17	2.03								
pzwaz3	8.85E+00	20.45	2.31	9.19	1.04	26.54	3.00	8.30	0.94		
wak2	2.00E-02	0.02	1.09			0.03	1.36				
pzwaz5	8.43E+00	9.71	1.15	8.17	0.97			25.30	3.00		
ooz1	8.13E+00	7.93	0.98	3.39	0.42			18.24	2.24	8.14	1.00
msz2	1.30E+01	16.50	1.27								
msz3	1.23E+01	36.90	3.00			36.90	3.00				
ook1	2.22E-02	0.03	1.13			0.02	1.12	0.02	1.04	0.02	0.96
ooz2	1.43E+01	10.71	0.75	14.91	1.04	4.78	0.33	21.03	1.47	4.78	0.33
msz1	1.34E+01	17.25	1.29								
msk1	4.94E-03	0.00	0.49								
ooz3	1.41E+01	13.11	0.93							6.13	0.44
brz1	8.67E+00	8.02	0.93					15.67	1.81		
brz2	8.53E+00	7.58	0.89	7.40	0.87			23.43	2.75		

	Deel gebied:	Schouwe-Duiveland/ Goere-Overflakkee		Walcheren/ Noord-Beveland		Tholen-St. Philipsland		Zuid-Beveland		Zeeuw-Vlaanderen	
Parameter	Waarde a-priori	Gecalibr. waarde	F	Gecalibr. waarde	F	Gecalibr. waarde	F	Gecalibr. waarde	F	Gecalibr. waarde	F
c_riv1	2.00E+00	5.58	2.79	2.81	1.40	5.58	2.79	0.47	0.23	0.60	0.30
c_riv2	2.00E+00	6.00	3.00	1.00	0.50	6.00	3.00	0.87	0.43	1.77	0.89
c_riv4	1.00E+01			1.28	0.13			5.25	0.53		
c_riv5	2.00E+00	4.66	2.33	2.90	1.45	2.99	1.49	2.95	1.47	0.84	0.42
c_riv6	5.00E+01	78.43	1.57	40.58	0.81	17.61	0.35	25.51	0.51	33.50	0.67
recharge	1.00E+00	0.90	0.90	0.90	0.90	1.00	1.00	0.90	0.90	0.90	0.90







# Deltares

PO Box 177  
2600 MH Delft, The Netherlands  
T +31 (0)88 335 82 73  
[info@deltares.nl](mailto:info@deltares.nl)  
[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)