

# Zoet-zout modelinstrumentarium voor de Provincie Zeeland



## Zoet-zout modelinstrumentarium voor de Provincie Zeeland

### **Auteur(s)**

Tobias Mulder

Gualbert Oude Essink

Perry de Louw




Huite Bootsma

## Zoet-zout modelinstrumentarium voor de Provincie Zeeland

<b>Opdrachtgever</b>	Provincie Zeeland, Waterschap Scheldestromen
<b>Contactpersoon</b>	Ronnie Hollebrandse (Provincie Zeeland) & Luuk Veening (Waterschap Scheldestromen)
<b>Trefwoorden</b>	Modelinstrumentarium, Zeeland, zoet-zout, verzilting, geohydrologisch model, droogtemaatregelen, automatisering workflow

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	3
<b>Datum</b>	09-04-2020
<b>Projectnummer</b>	11204457-000
<b>Document ID</b>	11204457-000-BGS-0001
<b>Pagina's</b>	56
<b>Status</b>	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.3	 Tobias Mulder	 Joost Delsman	 Otto de Keizer	
	Gualbert Oude Essink			
	Perry de Louw			
	Huite Bootsma			

# Samenvatting

Dit rapport beschrijft een generiek grondwater modelinstrumentarium dat gebruikt is om een nieuw grondwatermodel te genereren voor de provincie Zeeland (grondwatermodel Zeeland 2.0). Het modelinstrumentarium bestaat uit verschillende tools die de gebruiker in staat stellen om uit een basis-dataset een grondwatermodel te genereren op basis van een gekozen domein en celgrootte. De basisdata wordt hierbij omschreven tot input data voor het model. Dit garandeert een transparante en reproduceerbare workflow. Tevens zijn verschillende tools opgenomen om specifiek de mogelijkheid tot zoetwater opslag in de ondergrond kunnen doorrekenen. Ook het doorrekenen van klimaatscenario's, voor de hele provincie of deelgebieden, is onderdeel van het instrumentarium.

In samenwerking met Provincie Zeeland en Waterschap Scheldestromen is beoordeeld welke basisdata het meest up-to-date zijn. Belangrijke aanleiding voor het project was het beschikbaar komen van de FRESHEM data (voor de chlorideverdeling van de ondergrond) en de GeoTOP dataset (voor de karakterisatie van de ondergrond). In het oude grondwatermodel Zeeland (van Baaren et al., 2016) kon deze data nog niet worden meegenomen.

Om aanpassingen en verbeteringen in de datasets in de toekomst eenvoudig door te kunnen voeren sluit het modelinstrumentarium qua methodiek aan op de tools die worden gebruikt bij het maken van het Nationaal Hydrologisch Model met zoetzout koppeling (NHI zoet-zout).

Het nieuwe grondwatermodel Zeeland 2.0 is getoetst aan de hand van stijghoogtemetingen. Hierna zijn initiële kalibratiestappen genomen om de modelprestatie te verbeteren. De gemiddelde fout na deze initiële kalibratie bedraagt 41 centimeter. Ook is gekeken naar de stabiliteit van de zoet-zout verdeling in de ondergrond na 80 jaar. De stabiliteit van de zoet-zout verdeling is over het algemeen stabiel.

Het model is gezien de gemiddelde fout voor sommige toepassingen nog niet gebruiksklaar, dit vergt een uitgebreide kalibratie. Wel is het model op dit moment een uitstekend uitgangspunt voor detailstudies.

# Over Deltares

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme innovaties, oplossingen en toepassingen voor mens, milieu en maatschappij. We richten ons voornamelijk op delta's, kustregio's en riviergebieden. Omdat het beheer van deze dichtbevolkte en kwetsbare gebieden complex is, werken we nauw samen met overheden, ondernemingen, kennisinstellingen en universiteiten in binnen- en buitenland. Ons motto is 'Enabling Delta Life'.

Als toegepast kennisinstituut zijn we succesvol wanneer onze kennis wordt verzilverd in en voor de samenleving. We stellen hoge eisen aan de kwaliteit van onze kennis en adviezen, rekening houdend met nieuwe wetenschappelijke inzichten, maar ook met de gevolgen die onze adviezen hebben voor milieu en samenleving.

Al onze opdrachten en projecten leveren een bijdrage aan het verstevigen van de kennisbasis. We kijken vanuit een lange termijn perspectief, naar bijdragen voor de oplossingen voor nu. Wij hechten zeer aan openheid en transparantie. Die houding is onder meer terug te zien in het vrij toegankelijk maken van de door Deltares ontwikkelde software en modellen. Open source werkt, is onze vaste overtuiging. Deltares heeft ruim 800 medewerkers en is gevestigd in Delft en Utrecht.

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstellingen onderzoek	9
1.3	Context met overig verziltingsonderzoek Zeeland	9
1.4	Definities zoet-brak-zout grondwater	11
1.5	Afbakening voorziene resultaat	11
<b>2</b>	<b>Achtergrondinformatie</b>	<b>13</b>
2.1	Ontstaansgeschiedenis en geologie Zeeland	13
2.2	Geologie: kartering van de ondergrond	15
1.1.1	GeoTOP	15
1.1.2	REGIS	18
2.3	FRESHEM	18
<b>3</b>	<b>Aanpak</b>	<b>22</b>
3.1	Inleiding	22
3.2	Ontwikkelen modelinstrumentarium	23
3.2.1	Imod-python	23
3.2.2	Versiebeheer via Gitlab	23
3.2.3	Gebruik Snakemake	24
3.3	Modelleren van variabele grondwaterstroming en gekoppeld zout transport	24
3.3.1	IMOD-WQ	24
3.3.2	Versnelling rekentijden	25
3.4	Het grondwatermodel Zeeland 2.0	25
3.5	Verschillen in consistentie met LHM	27
3.5.1	Waterlopen	27
3.5.2	Onttrekkingen	27
3.6	Modelranden en randvoorwaarden	28
3.6.1	Geologie en hydraulische parameters in het numerieke model	28
3.7	Chloride concentratie verdeling in het grondwater	29
3.8	Onttrekkingen	30
3.9	Oppervlaktewatersysteem	30
3.9.1	Grote oppervlaktewateren	32
3.10	Drainage	32
3.11	Grondwateraanvulling	33
<b>4</b>	<b>Kalibratie en vergelijking met metingen</b>	<b>35</b>
4.1	Kalibratiestappen	35
4.2	Resultaat initiële kalibratie	35
<b>5</b>	<b>Resultaten</b>	<b>37</b>
5.1	Inleiding	37
5.2	Freatische grondwaterstand	37
5.3	Stijghoogte 1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	39
5.4	Chloride verdeling	40
5.4.1	Transect Nieuwvliet haaks	40
5.4.2	Transect Ossenissee haaks	41

5.4.3	Transect Schouwen-Duiveland	42
5.4.4	Transect Walcheren - Zuid-Beveland	43
5.4.5	Transect Zeeland noord-zuid	44
5.5	Kwelfluxen	45
5.5.1	Kwel en infiltratie winterhalfjaar	45
5.5.2	Kwel en infiltratie zomerhalfjaar	46
5.6	Zoutvracht	47
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen toepassingen</b>	<b>48</b>
6.1	Conclusie	48
6.2	Aanbevelingen	48
6.3	Toepassingen	49
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Visualisatie van de correlatie tussen de modelscripts</b>	<b>54</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Zoete grondwaterreserves zijn schaars in Zeeland. 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. Deze zoetwater voorkomens zijn van vitaal belang voor landbouw, industrie, ecologie, waterhuishouding en drinkwater reserves. Adequaat beheer van de zoete grondwater reserves is van essentieel belang voor de provincie Zeeland (van Baaren et al., 2016).

Het grondwatersysteem in 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. Al vanaf de Middeleeuwen is in Zeeland land aangewonnen. Met name in de 17de eeuw hebben op grote schaal bedijkingen plaatsgevonden (Schultz, 1992; Van De Ven, 1993). De geologische ontstaansgeschiedenis en inpolderingen gedurende de laatste eeuwen liggen ten grondslag aan de complexe verdeling van zoet, brak en zout grondwater in de provincie Zeeland.

Door de schaarste van zoete grondwaterreserves en de complexe verdeling van zoet, brak en zout grondwater is adequaat grondwaterbeheer van essentieel belang binnen de provincie Zeeland en waterschap Scheldestromen. Door klimaatverandering kunnen de reserves verder onder druk komen te staan. Om de weerbaarheid van de zoetwater voorkomens te vergroten wordt er onderzoek gedaan naar nieuwe technieken voor de opslag van zoet water in de ondergrond. In het Go-FRESH project (Oude Essink et al., 2014) worden drie maatregelen onderzocht om de zoetwater beschikbaarheid voor landbouw te vergroten. Uit de studie bleek dat verschillende lokale maatregelen kansrijk zijn. Om de effecten van maatregelen door te kunnen rekenen voor de hele provincie is een gedetailleerd grondwatermodel nodig.

In opdracht van de Provincie Zeeland is in 2005 het langjarig Verziltingsonderzoek “*Verzoeting-verziltiging van het grondwater in de provincie Zeeland*” gestart om verschillende aspecten van het zoet-zout grondwatersysteem te onderzoeken. De meest recente update van het grondwatermodel Zeeland werd opgeleverd in 2016. Dit betrof een driedimensionaal, gebiedsdekkend, dichtheidsafhankelijk, niet stationair, gekalibreerd grondwatermodel (van Baaren et al., 2016). Het bestaande model kent echter ook beperkingen omdat de gebruikte datasets niet altijd meer up-to-date zijn met de huidige datasets. De kwaliteit van de datasets, de software en de methodiek voor het vervaardigen van grote complexe hydrologische modellen hebben sindsdien belangrijke ontwikkelingen doorgemaakt.

Daarom is er binnen dit TKI project een start gemaakt voor het vervaardigen van een nieuw grondwatermodel (het grondwatermodel Zeeland 2,0). Nieuwe datasets zoals FRESHEM (van Baaren et al., 2018) en GeoTOP (Stafleu et al., 2010, 2011) in combinatie met het bestaande grondwatermodel voor de provincie Zeeland (van Baaren et al., 2016), vormen de basis voor dit generieke grondwater model om in de toekomst verschillende grondwaterprocessen en klimaatscenario's beter en nauwkeuriger door te kunnen doorrekenen. Het grondwatermodel wordt gemaakt aan de hand van verschillende tools die samen het modelinstrumentarium vormen. De basis voor zo'n instrumentarium voor de provincie Zeeland is gelegd in het TKI Watertechnologie project “Feasibility study subsurface fresh water storage Braakman South region” (Mulder et al., 2020). Hierbij is een studie uitgevoerd door Deltares en Dow Benelux B.V. naar de mogelijkheden van zoetwateropslag in de ondergrond in tijden van overschot voor de regio Braakman-Zuid. Dit water zou dan kunnen worden gebruikt in tijden van een tekort aan zoet water.



In dit project is het modelinstrumentarium opgeschaald van regio Braakman-Zuid naar de hele provincie Zeeland. Het nieuwe grondwater modelinstrumentarium is tot stand gekomen in samenwerking met de Provincie Zeeland en Waterschap Scheldestromen.

## 1.2 Doelstellingen onderzoek

In dit project ligt de focus op het ontwikkelen van een generiek grondwater modelinstrumentarium specifiek voor de provincie Zeeland waarbij de laatste datasets op het gebied van zoet-zout verdeling (FRESHEM) en de laatste parametrisatie van de ondergrond (GeoTOP) worden geïmplementeerd.

De specifieke doelen voor dit project zijn:

1. Ontwikkeling van een prototype set van tools voor het vervaardigen van een generiek modelinstrumentarium. Het modelinstrumentarium kan worden toegepast voor verschillende concepten:
  - a. Zonder dichtheidsafhankelijke stroming.
  - b. Met dichtheidsafhankelijke stroming, maar zonder verandering van de zoet-zout verdeling.
  - c. Een volledig dichtheidsafhankelijk model, niet-stationair, met zout-transport.
2. Realiseren van een zoet-zout model voor de gehele Provincie Zeeland, gebaseerd op tools. Hiermee wordt een initieel (niet volledig gekalibreerd) model gemaakt, dat kan worden toegepast in haalbaarheidsstudies naar opslag en onttrekking van zoetwater uit de ondergrond, voor de hele provincie.
3. Consistentie in procedures, methodiek en data-management voor het regionale Zeeland-model met het nationale NHI model en aangrenzende regionale modellen (Provincie Zuid-Holland).

## 1.3 Context met overig verziltingsonderzoek Zeeland

Het vervaardigen van het modelinstrumentarium voor de provincie Zeeland borduurt sterk voort op eerder opgedane kennis uit studies en promotieonderzoeken van De Louw (2013), Pauw (2015), Vos (2015) en Zuurbier (2016). Via meetcampagnes van regenwaterlenzen (Oude Essink et al., 2009) naar hypothesen over hoe het zoet-zout grondwatersysteem werkt (De Louw et al., 2011), naar regionale en lokale modelinstrumentaria om het huidige systeem na te bootsen en de toekomstige situatie te voorspellen. Feitelijk heeft het verziltingsonderzoek in de provincie Zeeland een aanzet gegeven van een reeks van vervolgprojecten waar zoet-zout grondwater een belangrijke rol speelt (Figuur 1). De projecten zijn over het algemeen in te delen in 4 hoofdlijnen en zijn hieronder opgesomd. In de laatste projecten is gaandeweg ook sprake van stakeholderparticipatie, kennisoverdracht en implementatie van innovatieve oplossingen voor een robuuste en flexibele zoetwatervoorziening (bijv. de Waterhouderij).

### Karakterisatie:

- In 2017 is de zoet-zout karakterisatie van de Zeeuwse ondergrond openbaar beschikbaar gekomen als belangrijkste resultaat van het FRESHEM project.
- De EU Interreg-projecten CLIWAT (geofysische meettechnieken als Airborne EM) en Climate Proof Areas (Schouwen-Duiveland) (Harbo et al., 2011)

**Proceskennis:**

- Het genoemde promotie onderzoek van Perry de Louw (De Louw, 2013)
- De monitoringcampagnes Waterdunen (Buma et al., 2008b)
- De Waterhouderij, met focus op Walcheren,
- Kwelvoorziening Perkpolder SEEPCAT (de Louw et al., 2017)
- Hydrologische Studie Kustlaboratorium voor het Zeeuws Landschap (van Baaren et al., 2012)

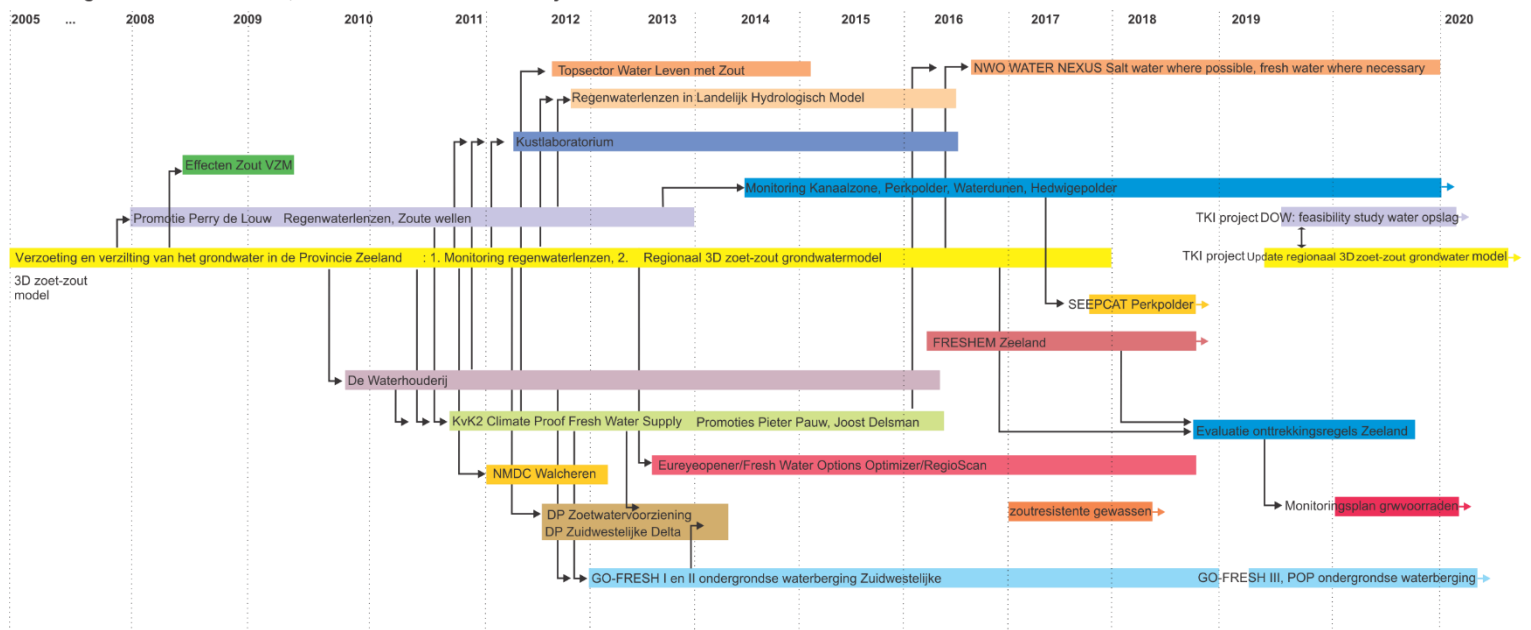
**Oplossingen en maatregelen:**

- De studie Effecten zout Volkerak-Zoommeer op grondwatersysteem (Oude Essink et al., 2008a)
- Het project Climate Proof Fresh Water Supply (Kennis voor Klimaat, tranche 2, thema 2, WP2, najaar 2010 – najaar 2014)
- Perkpolder (Buma et al., 2008a)
- Kanaal Gent-Terneuzen (van Baaren et al., 2014)
- Effecten van een zouter Kanaal Gent-Terneuzen op het grondwatersysteem (Faneca Sánchez and Oude Essink, 2015)
- Kreekkrug Infiltratie Proef voor Walcheren door Sommeijer (2013) en Sommeijer et al. (2013))
- Evaluatie Onttrekkingsregels Zeeland (Oude Essink & Pauw, 2018)
- De interactie zoet-zout grondwater en oppervlaktewater tijdens droge perioden, en zoete grondwatervoorraden onder invloed van grondwateronttrekkingen (Pauw et al., 2016).
- GO-FRESH (Pauw et al., 2015; Zuurbier et al., 2015)
- GO-FRESH Vlaanderen (de Louw et al., 2019)
- TKI studie Dow, feasibility studie zoetwateropslag (Mulder et al., 2019).

**Modellering:**

- Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de provincie Zeeland 1220185-000-BGS-0003, 22 oktober 2016
- Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium, in de vergelijking tussen regionaal versus landelijk (De Lange et al., 2014)
- De metastudie Zuid-Westelijke Delta (De Vries et al., 2009),
- Grensoverschrijdende modellering Vlaanderen, Lebbe et al. (2012),
- Nationaal Modellen en Data Centrum, project Kritische Zone (Walcheren)

## Verziltingsonderzoek Deltares, focus Proeftuin Zuidwestelijke Delta



Figuur 1 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 dienen als basis voor het volgende.

### 1.4 Definities zoet-brak-zout grondwater

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 verbouwt. In deze rapportage en in voorgaande rapportage van het gekalibreerde Zeeland model uit 2016 (van Baaren et al., 2016) spreken we van *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

### 1.5 Afbakening voorziene resultaat

Het resultaat van dit onderzoek is een modelinstrumentarium dat in staat is om een (niet volledig gekalibreerd) regionaal 3D model van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming te genereren. Het instrumentarium bestaat uit tools, specifiek voor de provincie Zeeland, en sluiten aan op de tools die worden gebruikt bij het maken van het Nationale model (NHI-Zoetzout) en regionale modellen (Provincie Zuid-Holland, COASTAR Westland, COASTAR MT-Polder - Oude-Rijn, brakwaterwinning Dunea, Braakman-Zuid TKI Dow).

De toolbox stelt de gebruiker in staat om met 'één druk op de knop' een model te genereren. Er kan tevens een uitsnede worden gemaakt, en de celgrootte kan worden aangepast waarna de afhankelijke modelparameters worden verschaald. Bijkomend voordeel van het gebruik van de toolbox is dat een reproduceerbare en transparante workflow ontstaat.

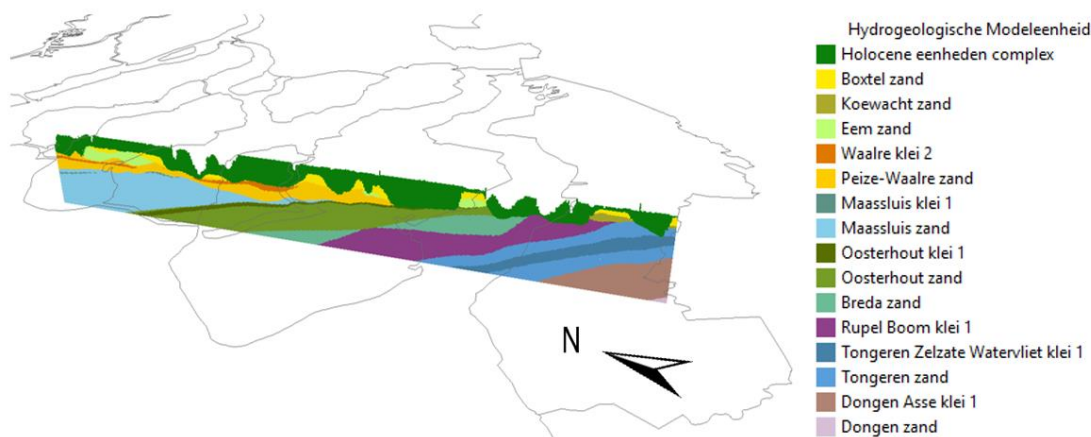
In de toolbox zijn tevens functies opgenomen om relatief eenvoudig scenario's te genereren die de geohydrologische mogelijkheden van ondergrondse opslag en onttrekking van zoet water te onderzoeken. Omdat het model nog niet volledig gekalibreerd is kunnen deze scenario's nog niet worden doorgerekend. De onzekerheid van de modelresultaten is hiervoor op dit moment nog te groot. De kanskaarten uit Go-FRESH (Oude Essink et al., 2018) kunnen hierbij worden gebruikt als input voor verschillende scenario's.

## 2 Achtergrondinformatie

### 2.1 Ontstaansgeschiedenis en geologie Zeeland

De recente 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).

Oudere afzettingen tonen een verhang richting het noordoosten (Van Rummelen, 1965) (Figuur 2). De Paleogene en Neogene formaties bestaan uit ondiepe mariene afzettingen van fijn tot matig zand en zeeklei. Voor de hydrologie is de lage conductiviteit van delen van de Rupel Formatie belangrijk als scheidende laag, bestaande uit stevige zeeklei. Door het verhang naar het noordoosten zijn Neogene en Paleogene afzettingen in Zeeuws-Vlaanderen tot ca. 10 meter beneden maaiveld aanwezig, terwijl ze in de rest van Zeeland op veel grotere diepte voorkomen. Bovenop de Paleogene en Neogene afzettingen zijn verschillende Pleistocene afzettingen aanwezig. Tot deze Pleistocene afzettingen horen de Waalre Formatie (zand en klei uit estuaria), de Eem Formatie (mariene fijne tot medium fijne mariene zanden) en de Boxtel Formatie (eolische fijne zanden).



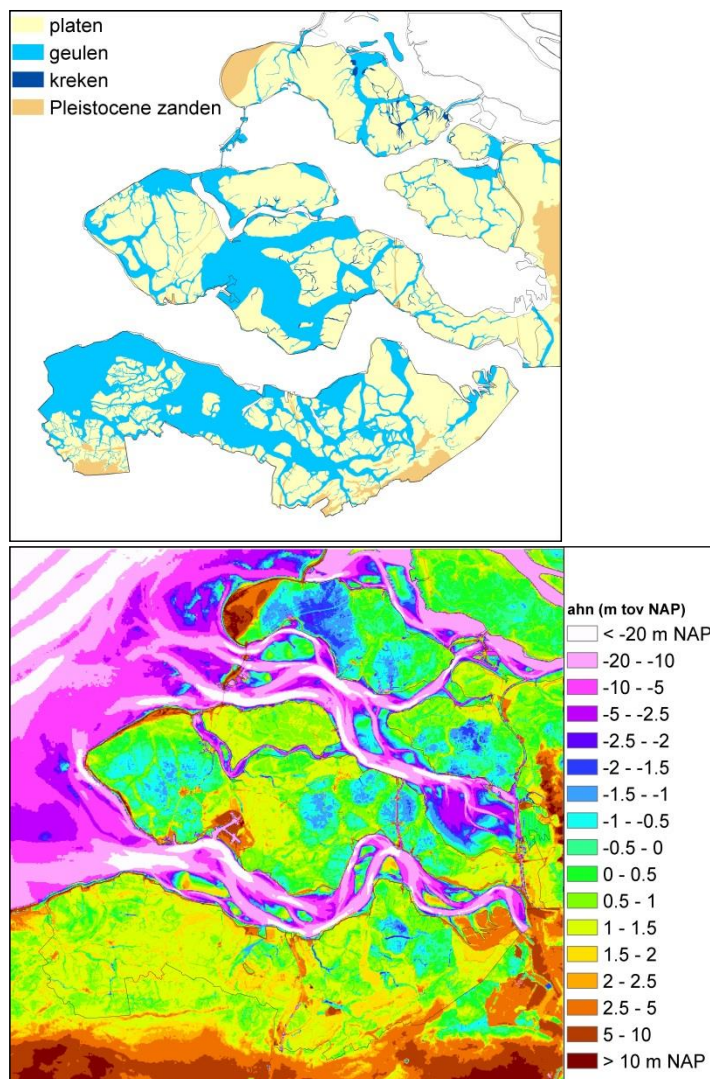
Figuur 2 Geologische doorsnede door Zeeland. Het verhang van eenheden ouder dan het Pleistoceen is duidelijk zichtbaar.

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 in het Holoceen (het Basisveen). Dit werd bedekt door klei en vervolgens wad afzettingen (zand in geulen, klei in de kwelders) als gevolg van de voortdurende zeespiegelstijging. De afzettingen zijn tot ver ten oosten van de huidige kustlijn afgezet.

Toen de kust door strandwallen werd afgesloten, verlandde het achterliggende getijdengebied 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 krekken (getijdegeulen) vormden tijdens de Holocene transgressie de laagste delen van het landschap. Wanneer 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 klomk 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 kreekkruggen, 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 kreekkruggen (Figuur 3 boven) zijn duidelijk zichtbaar op de maaiveldkaart (Figuur 3 onder) en kunnen tot 2 m hoger liggen dan het omringende landschap (De Vries et al., 2009).



Figuur 3 Boven: Kartering van platen, geulen, krekken en Pleistocene zanden (REGIS) en Onder: Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN).



Figuur 4 Grondsoortenkaart

## 2.2 Geologie: kartering van de ondergrond

Voor de geologische kartering van de ondergrond zijn twee datasets gebruikt. GeoTOP (Stafleu et al., 2011) is gebruikt voor de parametrisatie van de bovenste 50 meter van de ondergrond. Regis II.2 (Vernes et al., 2005, Hummelman et al., 2019) is gebruikt vanaf een diepte van 50 meter tot 137 meter. Op maximaal 137 meter diepte ligt in Zeeland de Geohydrologische basis.

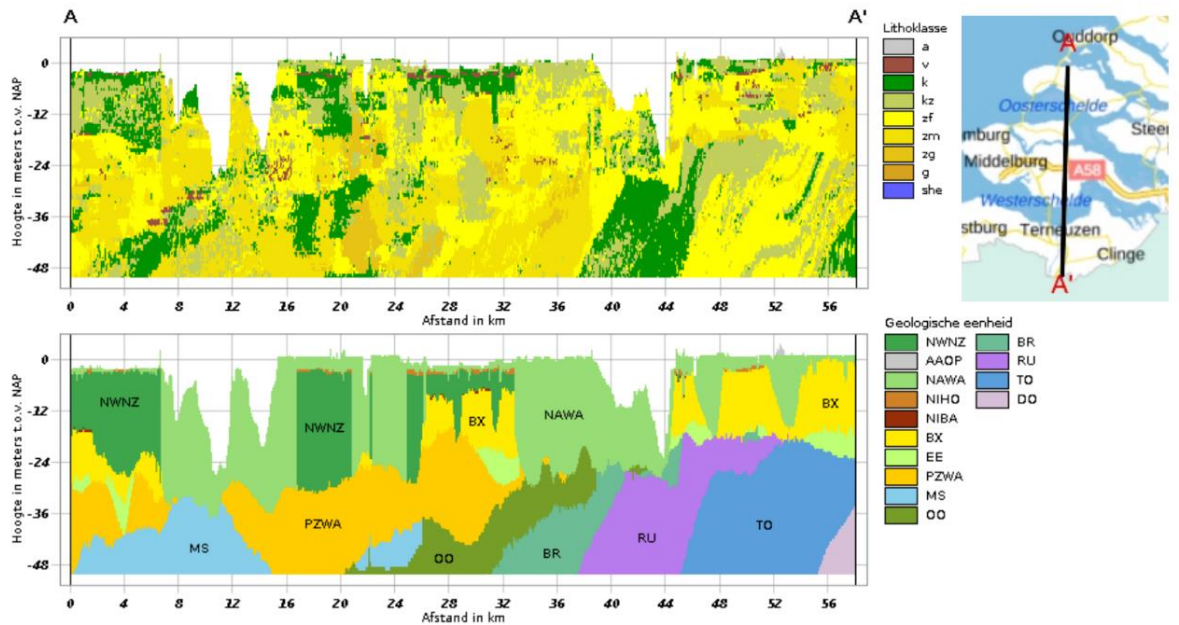
### 1.1.1 GeoTOP

In GeoTOP is de ondergrond onderverdeeld in een regelmatig grid van aaneengesloten voxels (volumecellen) van 100 bij 100 m in de horizontale richtingen en 50 cm in de verticaal. Voor elke voxel wordt geschat tot welke geologische eenheid de voxel behoort en wat de voor de voxel representatieve lithoklasse is (Stafleu., 2012). De lithoklassen met bijbehorende afkorting uit GeoTOP zijn:

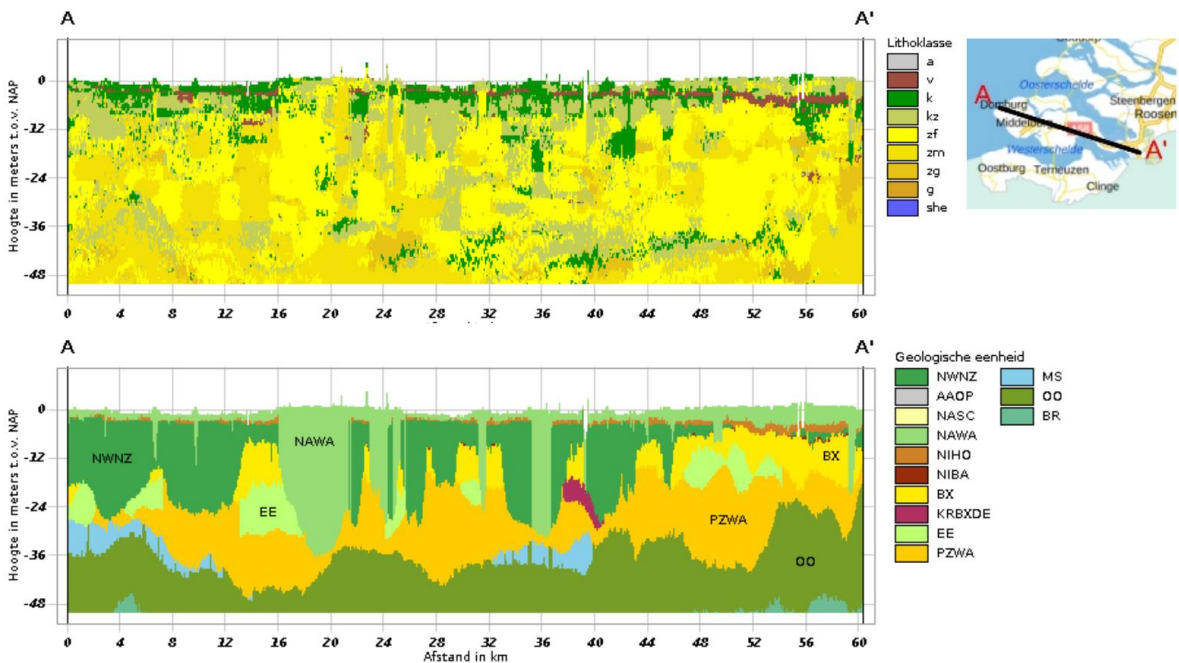
- Antropogeen (a)
- Organisch materiaal (v)
- Klei (k)
- Kleiig zand, zandige klei en leem (kz)
- Fijn zand (fz)
- Matig grof zand (zm)
- Grof zand (zg)
- Grind (g)
- Schelpen (she)

De lithoklasse wordt berekend in een stochastisch rekenproces dat resulteert in 100 statistisch gezien even waarschijnlijke schattingen. Omdat het in veel toepassingen ondoenlijk is om met 100 verschillende modeluitkomsten te werken wordt de 100 uitkomsten samengevat in één 'meest waarschijnlijke lithoklasse' (Stafleu et al., 2012). Ook in de visualisaties op DINOloket wordt de 'meest waarschijnlijke lithoklasse' getoond. De berekening van deze 'meest waarschijnlijke lithoklasse' is ingewikkelder dan het op het eerste gezicht misschien lijkt (Stafleu et al., 2012). Soares (1992) heeft een algoritme ontwikkeld om uit de kansen (berekend als het aantal keren dat een lithoklasse is geschat gedeeld door 100) voor elke voxel een meest waarschijnlijke uitkomst te berekenen. Voor een beschrijving van het stochastisch rekenproces dat resulteert in de 100 statistisch gezien even waarschijnlijke uitkomsten wordt verwezen naar het rapport GeoTOP modellering (Stafleu et al., 2012).

Figuur 5 toont een noord-zuid doorsnede van GeoTOP door de Provincie Zeeland. Hierbij wordt zowel de lithoklasse als de geologische eenheid weergegeven. De Ooster- en Westerschelde zijn hierin te herkennen als insnijdingen in het lagenpakket tot een diepte van ca. -25 m NAP. In Figuur 6 toont een doorsnede van west naar oost door Walcheren en Zuid-Beveland uit het GeoTOP model. In de bovenste 10 meter van de ondergrond is voornamelijk klei en veen aanwezig uit respectievelijk het laagpakket van Walcheren van de Naaldwijk Formatie (NAWA) en Hollandveen uit de Formatie van Nieuwkoop (NIHO). Op grotere dieptes bestaat de ondergrond voornamelijk uit zand.



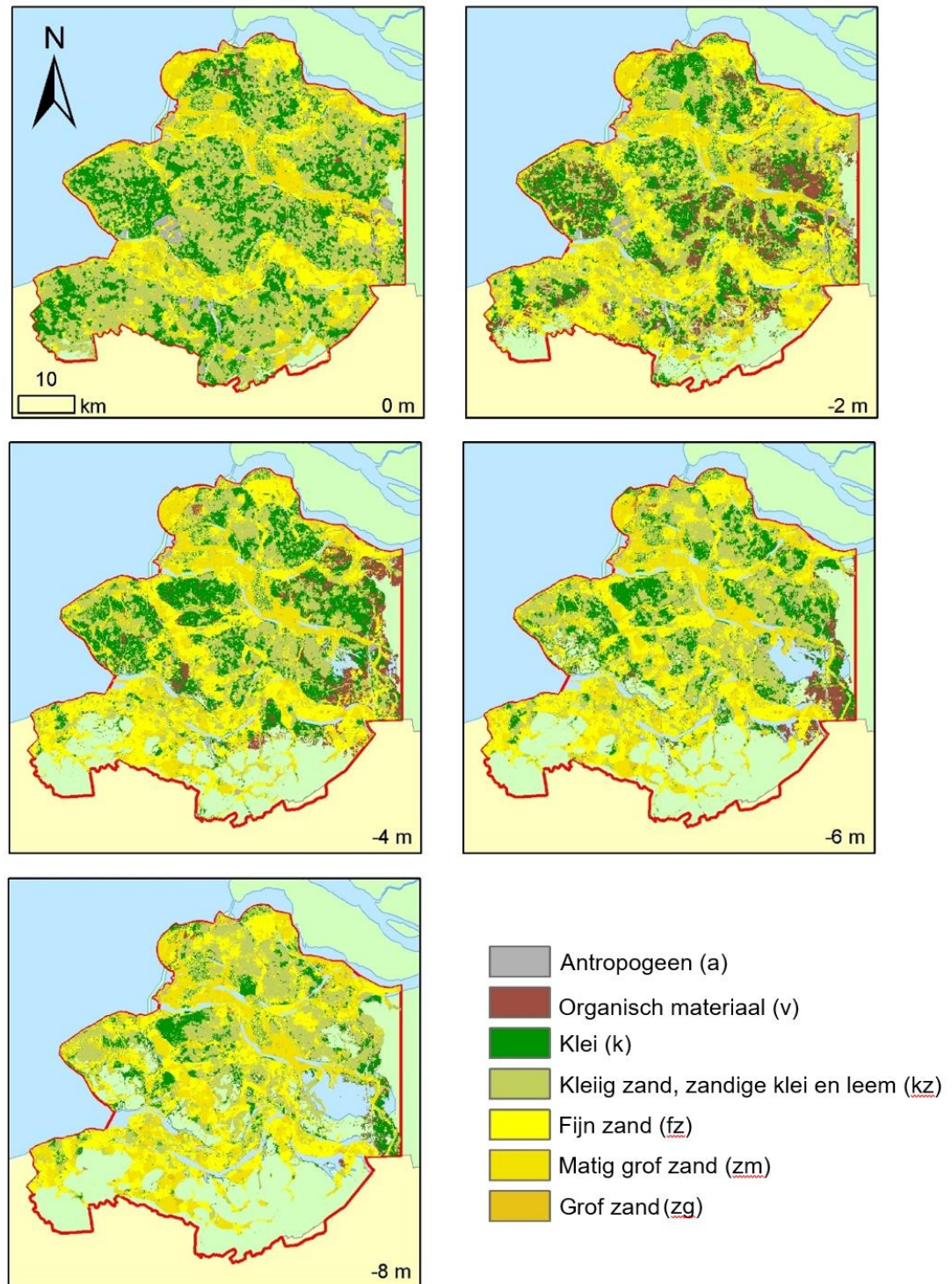
Figuur 5 Noord-Zuid doorsnede door Zeeland van de GeoTOP parametrisatie van de ondergrond. Boven: meest waarschijnlijke lithoklasse, Onder: meest waarschijnlijke geologische eenheid.



Figuur 6 West-oost doorsnede door Zeeland van de GeoTOP parametrisatie van de ondergrond. Boven: meest waarschijnlijke lithoklasse, Onder: meest waarschijnlijke geologische eenheid



Figuur 7 geeft een bovenaanzicht van het GeoTOP model op 5 verschillende dieptes (0, -2, -4, -6 en -8 m NAP). De zandige geulafzettingen worden hierin steeds beter zichtbaar naar de diepte toe. Deze hoger gelegen zandige afzettingen bevatten over het algemeen diepere zoetwatervoorkomens dan de lager gelegen kleiige polders.

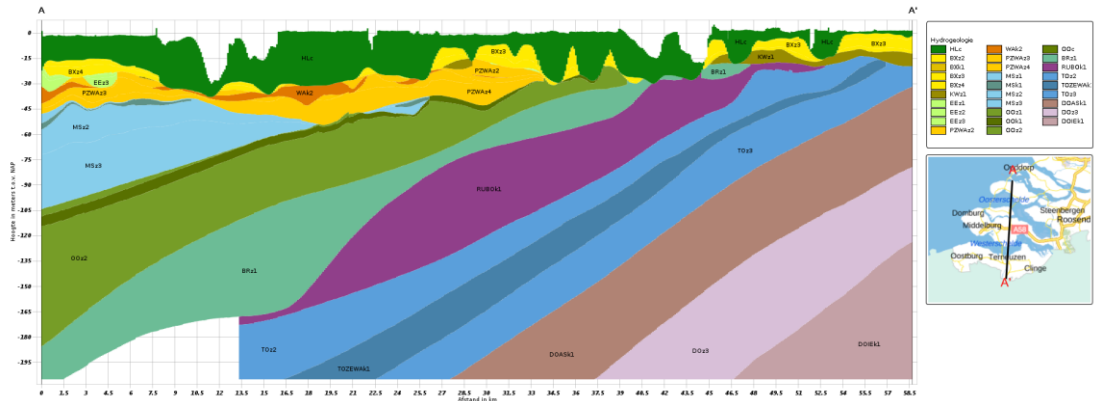


Figuur 7 Boven-aanzicht van lithoklasse kaarten variërend in diepte. De zandige geulafzettingen (geel) worden naar de diepte toe steeds beter zichtbaar (Stafleu et al., 2011).

### 1.1.2 REGIS

De geohydrologische schematisatie van het grondwatermodel dieper dan 50 m - NAP is gebaseerd op het hydrogeologische model REGIS II.2. De REGIS II.2 kartering geeft inzicht in de 3D verdeling van watervoerende pakketten (zandlagen) en slecht doorlatende lagen (o.a. klei, veen en leemlagen).

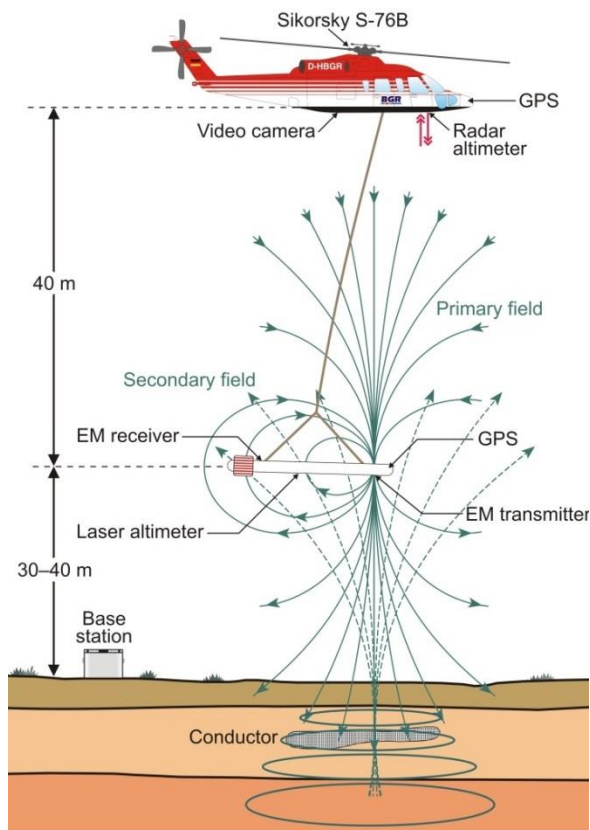
In Figuur 8 is een noord-zuid doorsnede van REGIS opgenomen op de locatie waar in sectie 1.2.1 voor GeoTOP een doorsnede is getrokken. Het Holocene pakket (donkergroen) varieert in dikte. Ook het verhang van de Paleogene en Neogene lagen richting het noorden is goed zichtbaar.



Figuur 8 Noord-zuid doorsnede door Zeeland van de REGIS parametrisatie van de ondergrond.

## 2.3 FRESHEM

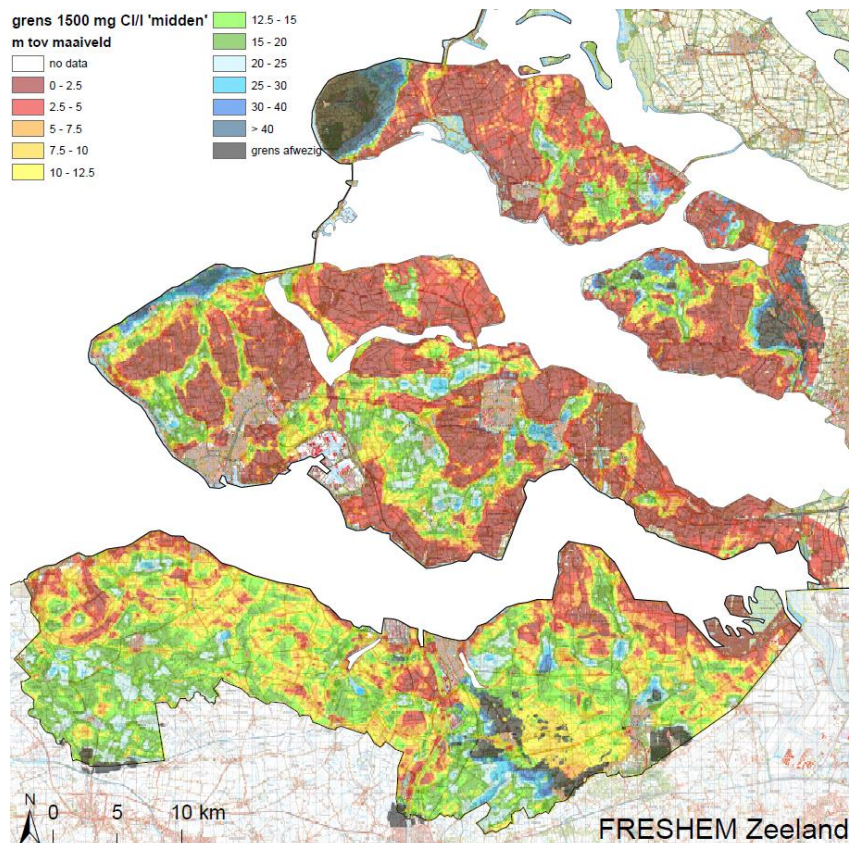
Binnen het project FRESHEM Zeeland, heeft Deltares samen met TNO en BGR een methode ontwikkeld om Helicopter Electromagnetic Measurements (HEM) (Figuur 9) data om te zetten in informatie over zoet, brak en zout grondwater (van Baaren et al., 2018).



Figuur 9 Schematische weergave van het BGR geofysische meetsysteem (van Baaren et al., 2018).

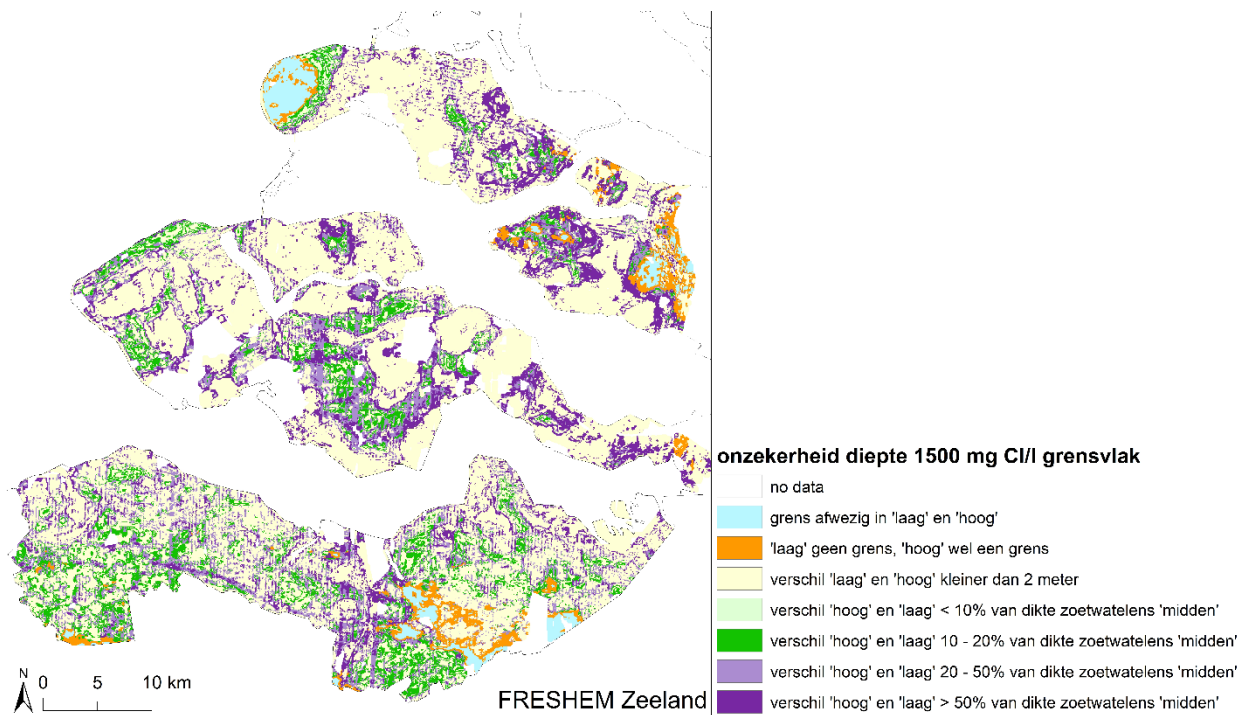
De hele provincie Zeeland is in kaart gebracht door een totaal van 9000 kilometer aan vlieglijnen, waar elke 4 meter een meting is uitgevoerd. De afstand tussen de vlieglijnen varieert tussen de 100 en 300 meter. Het resultaat van de metingen is een gedetailleerde, volledig 3D, chloride verdeling van het grondwatersysteem tot een diepte van 20 tot 150 meter beneden maaiveld.

In Figuur 10 is de zoet-zout grens (grens bij 1500 mg/l) ten opzichte van maaiveld weergegeven voor het 50<sup>e</sup> percentiel. Hierin zijn grote verschillen in de diepte van het zoet-zout grensvlak waar te nemen. In hoger gelegen zandige gebieden (zoals bijvoorbeeld kreekruggen) ligt het zoet-zout grensvlak dieper. In de laag gelegen polders komt het zoet-zout grensvlak in sommige gevallen tot aan maaiveld. De FRESHM dataset is gebruikt als initiële chloride verdeling van het Zeeland model.



Figuur 10 Zoet-zout grensvlak (1500 mg/L) van het 50<sup>e</sup> percentiel (midden) uit de FRESHEM dataset. De data geeft een zeer gedetailleerd beeld van de chlorideverdeling van de Zeeuwse ondergrond (van Baaren et al., 2018)

De onzekerheid van verschillende parameters is meegenomen in de afleiding van de chloride verdeling in de ondergrond. Het 50<sup>e</sup> percentiel van de afleiding is in het model als initiële chlorideverdeling gekozen. Figuur 11 toont het verschil tussen het 25<sup>e</sup> percentiel (laag) en het 75<sup>e</sup> percentiel (hoog). Het verschil tussen het 25<sup>e</sup> en 75<sup>e</sup> percentiel is op sommige plaatsen meer dan de helft van de dikte van de zoetwaterlens uit het 50<sup>e</sup> percentiel. De FRESHEM dataset kan daarmee worden gezien als zeer gedetailleerde weergave van de zoet-zout verdeling, maar niet als absolute werkelijkheid.



*Figuur 11 Onzekerheid van de diepte van het 1500 mg/l grensvlak. Uitgedrukt in het verschil tussen het 25e percentiel (laag) en het 75e percentiel (hoog) ten opzichte van het 50e percentiel (midden) (van Baaren et al., 2018).*

## 3 Aanpak

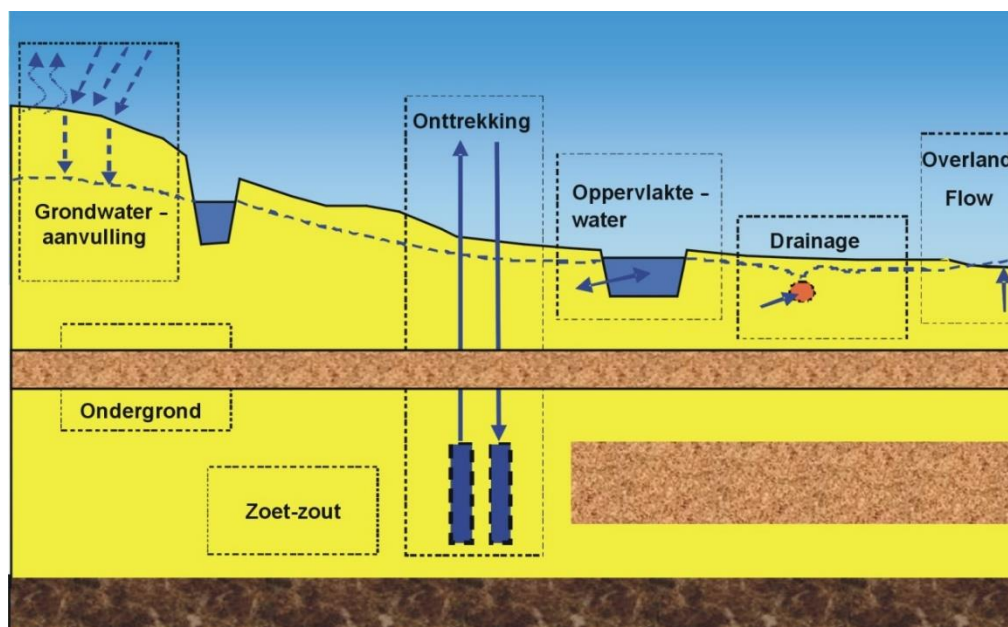
### 3.1 Inleiding

Binnen dit project ligt de focus op het maken van een modelinstrumentarium. Het modelinstrumentarium kan worden gebruikt om modellen op te zetten, door te rekenen en te analyseren voor de Provincie Zeeland en Waterschap Scheldestromen. Wanneer in het rapport wordt gesproken over het Zeeland-model dan spreken we over het met behulp van dit modelinstrumentarium voor de gehele provincie Zeeland gegenereerde grondwatermodel.

In zijn geheel bestaat het modelinstrumentarium uit:

- Scripts: de scripts worden gebruikt om inputdata om te schrijven naar daadwerkelijke modelinput. Verder worden de scripts gebruikt om modeloutput te analyseren en te visualiseren.
- Input data: de input data wordt door de toolbox aangepast en omgeschreven tot modelinput. Hierbij blijft de folder met inputdata in originele staat behouden.
- Modelsoftware (iMOD-WQ) om de modellen door te kunnen rekenen

Bij het opzetten van de toolbox is in de aanpak rekening gehouden met de reproduceerbaarheid van de gegenereerde modellen. Vanuit een database met basisdata moet op een transparante manier, en met een druk op de knop, een model worden gegenereerd met een gekozen modeldomein (binnen de provincie Zeeland). Het model omvat verschillende geohydrologische concepten die door interactie tot een geohydrologisch model leiden (Figuur 12). Het model moet vervolgens nog worden gekalibreerd en gevalideerd. De kalibratiestappen voor het model met de gekozen randvoorwaarden worden vervolgens door de modelleur aan de modeltoolbox toegevoegd. Op die manier ontstaat een transparante en reproduceerbare workflow. Het script met kalibratiestappen voor het model zal soms moeten worden aangepast wanneer een andere discretisatie (modeluitsnede/ verfijning van celgrootte) wordt gekozen. De nieuwe discretisatie kan anders ten koste gaan van de modelprestatie op het gebied van stijghoogte en zoet-zout verdeling. De mogelijkheid om het model te knippen in tijd en ruimte en te verscalen is opgenomen in het modelinstrumentarium.



Figuur 12 De verschillende hydro(geo)logische concepten die worden meegenomen in de modellering (Van Baaren et al., 2016)

## 3.2 Ontwikkelen modelinstrumentarium

In het verleden werden de grondwatermodellen ontwikkeld door inputdata aan te passen, om te schrijven naar modelinput en werden verschillende versies gemaakt om verschillende scenario's door te rekenen. De aanpassingen werden daarbij los bijgehouden in een workflow document. Versiebeheer van de verschillende versies van modellen bestond zo doorgaans uit een tekstdocument.

De reproduceerbaarheid van de modellen was sterk afhankelijk van de kwaliteit van het workflow document. Om de reproduceerbaarheid en de transparantie van modellen te vergroten is gewerkt aan een geautomatiseerde workflow. De geautomatiseerde workflow wordt ondersteund door scripts en software pakketten. In dit hoofdstuk gaan we verder in hoe deze scripts en softwarepakketten samen met de ruwe inputdata tot een modelinstrumentarium leiden voor de provincie Zeeland.

### 3.2.1 Imod-python

Onder de naam imod-python is een open source Python pakket ontwikkeld, gericht op het genereren van model input van iMODFLOW en iMOD-WQ (iMOD-WQ) modellen, en het verwerken en analyseren van modelresultaten (Delsman et al., 2020). De volledige documentatie is te vinden op [imod.xyz](http://imod.xyz).

Python is een flexibele, leesbare, open source programmeertaal, en ideaal voor het schrijven van scripts. Scripts zijn bijzonder geschikt voor grondwatermodellering of data analyse. Een script is een precieze beschrijving van alle bewerkingen die op de data zijn gedaan. Door uitsluitend data via scripts te bewerken, bestaat er een volledig getuigschrift van het gehele modelleerproces. Dit maakt het veel gemakkelijker om fouten op te sporen en te corrigeren. Bovendien is zo'n aanpak bij uitstek reproduceerbaar: mits goed opgezet, kan een modelstudie met een druk op de knop relatief eenvoudig opnieuw worden uitgevoerd (Delsman et al., 2020).

Globaal bestaat imod-python uit de volgende componenten:

- Modules om iMODFLOW en iMOD-WQ (iMOD-WQ) bestanden te lezen en te schrijven.
- Modules om volledige input van modelleren te genereren vanuit Python (vergelijkbaar met FloPy (Bakker et al., 2016) voor regulier MODFLOW).
- Modules voor geografische data: verscalen van celgrootte met specifieke methodes, ruimtelijke interpolaties, verrastering van vector data, her projectie tussen coördinatensystemen, etc.
- Modules voor analyse van modelresultaten: specifieke selectie of visualisatie van data. Bijvoorbeeld tools om de waterbalans te analyseren, of problemen in modelperformance op te sporen.

Een typisch script in een workflow zal slechts in beperkte mate specifieke imod-python functies gebruiken: de meerderheid van het werk wordt gedaan door functies die reeds beschikbaar zijn in de hier genoemde pakketten. De functies in imod-python vullen bestaande methodes aan, of bieden alternatieven wanneer de standaard methodes niet snel, efficiënt, of gebruikersvriendelijk genoeg zijn. Het doel is om het pakket daarmee relatief lichtgewicht te houden (Delsman et al., 2020).

### 3.2.2 Versiebeheer via Gitlab

Om aanpassingen aan scripts vast te leggen en verschillende modelversies te documenteren wordt gebruik gemaakt van Gitlab. Gitlab is een vrij gedistribueerd versiebeheersysteem. Het wordt ook wel een softwarebroncode-managementproject genoemd. Door het versiebeheer te automatiseren wordt de reproduceerbaarheid van de modellen sterk vergroot. De structuur van de mappen in Gitlab is opgenomen in onderstaande afbeelding. Wanneer scripts worden aangepast worden deze naar Gitlab gepusht. Daar wordt automatisch bijgehouden wat de aanpassingen zijn ten opzichte van het vorige script.

```

├─ AUTHORS.md
├─ LICENSE
├─ README.md
├─ bin          <- Your compiled model code can be stored here (not tracked by git)
├─ config      <- Configuration files, e.g., for doxygen or for your model if needed
├─ data
│  └─ 1-external <- Data external to the project.
│  └─ 2-interim  <- Intermediate data that has been altered.
│  └─ 3-input    <- The processed data sets, ready for modeling.
│  └─ 4-output   <- Data dump from the model.
│  └─ 5-visualization <- Post-processed data, ready for visualisation.
├─ docs        <- Documentation, e.g., doxygen or scientific papers (not tracked by git)
├─ notebooks   <- Jupyter notebooks
├─ reports     <- For a manuscript source, e.g., LaTeX, Markdown, etc., or any project reports
│  └─ figures   <- Figures for the manuscript or reports
├─ src         <- Source code for this project
│  └─ 0-setup   <- Install necessary software, dependencies, pull other git projects, etc.
│  └─ 1-prepare <- Scripts and programs to process data, from 1-external to 2-interim.
│  └─ 2-build   <- Scripts to create model specific inputm from 2-interim to 3-input.
│  └─ 3-model   <- Scripts to run model and convert or compress model results, from 3-input to 4-output.
│  └─ 4-analyze <- Scripts to post-process model results, from 4-output to 5-visualization.
│  └─ 5-visualize <- Scripts for visualisation of your results, from 5-visualization to ./report/figures.

```

Figuur 13 Structuur van de mappen in Gitlab

### 3.2.3 Gebruik Snakemake

Wanneer input data wordt geüpdate of een script wordt aangepast, is het vaak niet nodig om alle scripts nog een keer te draaien. Zo kan het voorkomen dat het inputbestand met onttrekkingen wordt aangepast maar dat de modelinput voor drainage en rivieren onveranderd kan blijven. Om de update snel door te voeren is het dus handig om alleen de scripts uit te voeren die een verband houden met de nieuwe input data of het aangepaste script.

Snakemake is een workflow management systeem dat de correlatie tussen input en scripts bijhoudt. Op die manier kan via Snakemake software automatisch worden bepaald welke scripts opnieuw moeten worden gedraaid, en welke scripts (en daarmee modelinput) onveranderd kunnen blijven. Deze manier van werken verkleint de kans dat een script over het hoofd wordt gezien, en vermindert de tijd die het kost om een model opnieuw te genereren. De correlatie tussen de verschillende scripts kan worden gevisualiseerd en is opgenomen in Bijlage A.

## 3.3 Modelleren van variabele grondwaterstroming en gekoppeld zout transport

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 door drukverschillen zoet grondwater wegdrücken. 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 (Van Baaren et al., 2016).

### 3.3.1 IMOD-WQ

De softwarecode die gebruikt wordt is iMOD-WQ. Voor het reeds bestaande Zeeland model is de softwarecode MOCDENS3D gebruikt. De MOCDENS3D 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. Momenteel wordt de code SEAWAT (Langevin et al., 2008) wereldwijd het meest gebruikt om zoet-zout grondwater te modelleren. IMOD-WQ is op SEAWAT gebaseerd. De software beschikt over de parallelisatie van SEAWAT code en is verenigbaar met de nieuwe MODFLOW6 software.



### 3.3.2 Versnelling rekentijden

Het modelleren van zoet-zout grondwater kent door de koppeling van grondwaterstroming met zouttransport relatief (zeer) lange rekentijden als lange simulatieperiodes worden doorgerekend. Recent is in een samenwerking tussen Universiteit Utrecht en Deltares de softwarecode iMOD-WQ voor specifieke toepassingen geparalleliseerd, waardoor sterk verkorte rekentijden mogelijk zijn (Verkaik et al., 2018). Deze parallelisatie is verder geoptimaliseerd en opgenomen in de recent gereedgekomen iMOD-WQ software. Berekeningen kunnen eenvoudig parallel worden uitgevoerd op rekenclusters (Delsman et al., 2020).

Naast parallelisatie kan zouttransport modellering tot ordes worden versneld door slim te kijken naar de gehanteerde discretisatie in relatie tot de vereiste stabiliteitscriteria. Binnen imod-python zijn evaluatie-tools beschikbaar gemaakt om mogelijke problemen met rekentijden te onderkennen en op te lossen (Delsman et al., 2020).

## 3.4 Het grondwatermodel Zeeland 2.0

Het 3D dichtheidsafhankelijke grondwatermodel van de provincie Zeeland (hierna grondwatermodel Zeeland 2.0) is volledig driedimensionaal. 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).

Het grondwatermodel Zeeland 2.0 dat is ontwikkeld met het modelinstrumentarium is zowel stationair als niet-stationair doorgerekend. De niet-stationaire run beslaat een gesimuleerde periode van 80 jaar. De tijdstapgrootte bedraagt 6 maanden voor het winterhalfjaar (oktober – april) en voor het zomerhalfjaar (april – oktober). Het grondwatermodel Zeeland 2.0 is gevalideerd en enkele kalibratie stappen zijn genomen. Wanneer het grondwatermodel Zeeland 2.0 volledig gekalibreerd is, is het in staat de huidige en toekomstige verzilting en verzoeting van het freatische grondwater in de provincie Zeeland te kwantificeren. Ook kan het model worden toegepast in haalbaarheidsstudies voor de (kleinschalige) opslag en onttrekking van zoet grondwater (verschillende technieken zijn beschreven in de Go-Fresh studie (Oude Essink et al., 2018)).

Het modelgebied is weergegeven in Figuur 14. De resolutie van de modelcellen is  $100 \times 100 \text{ m}^2$ . Er zijn 40 modellagen gedefinieerd waarbij de bovenste modellagen (rond het freatische grondwater) slechts 0.5 m dik zijn.



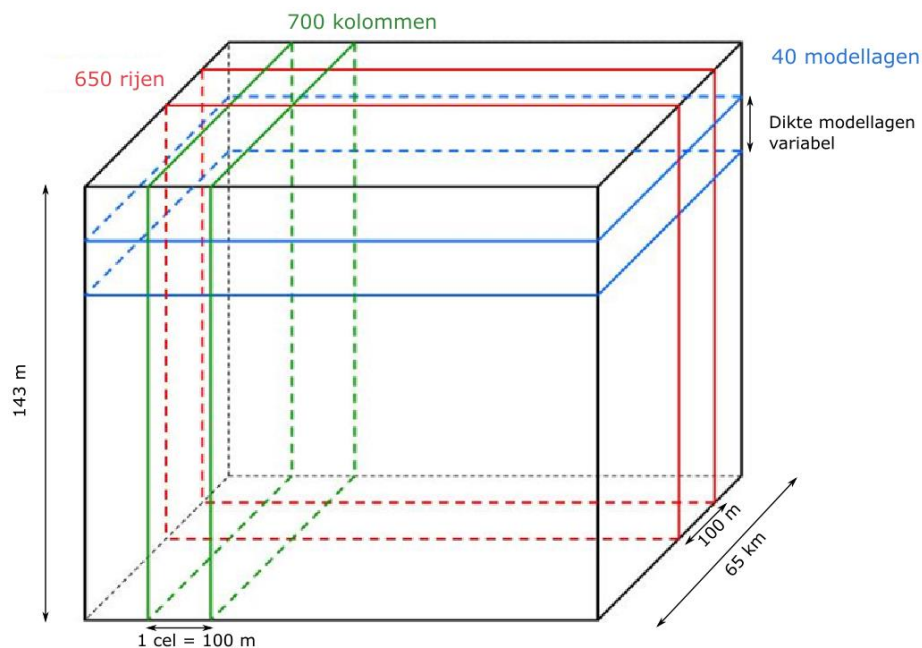
Figuur 14 Grootte van het modelgebied (zwarte kader)

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 op meer detail in het freatisch watervoerend pakket te berekenen. De zoutvrachten naar het oppervlaktewatersysteem kunnen zodoende nauwkeuriger worden gemodelleerd. De modellagen nemen met de diepte in dikte toe tot een maximale dikte van 10 meter. 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 Baaren et al., 2016).

Van west naar oost is het model 70 km breed, van noord naar zuid is dit 65 km. In totaal bevat het model 18.200.000 cellen (Figuur 15, Tabel 1).

Tabel 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



Figuur 15 Modelafmetingen van het Zeeland model. De bovenkant van het model ligt om +6 m NAP en de onderkant op -137 m NAP.

### 3.5 Verschillen in consistentie met LHM

Een van de doelstellingen van dit project is het consistent maken van de methodiek om modellen te maken met het LHM. Op die manier kan nieuwe data via het NHI portal worden aangeleverd en relatief eenvoudig worden verwerkt in de regionale modellen. In sommige gevallen is het niet raadzaam om de methodiek of data uit het LHM te gebruiken. Hieronder een overzicht van verschillen met het LHM.

#### 3.5.1 Waterlopen

Vanwege het grotere detail van de legger van Waterschap Scheldestromen is ervoor gekozen om de invoerbestanden uit het LHM niet te gebruiken.

Bij het verscalen van de LHM bestanden (250x250 meter) zou een relatief grote onzekerheid kunnen ontstaan wanneer binnen een gebied wordt ingezoomd. Door gebruik te maken van de dataset van Waterschap Scheldestromen kunnen kleine sloten en watergangen beter worden meegenomen. Uniformiteit in de opbouw van regionale en landelijke datasets vergemakkelijkt het switchen en aansluiten. Op termijn is het daarom wenselijk dat de 'regionale' methode om leggerdata naar waterlopen te vertalen in het geohydrologisch model, in het LHM wordt overgenomen. Voor lopende ontwikkelingen binnen NHI op het gebied van oppervlaktewater wordt verwezen naar de NHI website (<http://nhi.nu/nl/index.php/uitvoering/module-oppervlaktewater>)

#### 3.5.2 Onttrekkingen

In het LHM worden voornamelijk de grote onttrekkingen meegenomen in de modellering. Deze onttrekkingen komen uit het Landelijk Grondwater Register (LGR). Omdat veel kleine onttrekkingen regionaal van invloed kunnen zijn op de stijghoogte is ervoor gekozen om de data voor de onttrekkingen niet rechtstreeks over te nemen van het LHM. In plaats daarvan worden ook de kleinere onttrekkingen uit het LGR meegenomen. Wanneer de structuur van de LGR data gelijk blijft kan een actualisering van het LGR eenvoudig worden meegenomen in het model. Voor lopende ontwikkelingen binnen NHI op het gebied van onttrekkingen wordt verwezen naar de NHI website (<http://nhi.nu/nl/index.php/uitvoering/actualisatie-onttrekkingen>)

## 3.6 Modelranden en randvoorwaarden

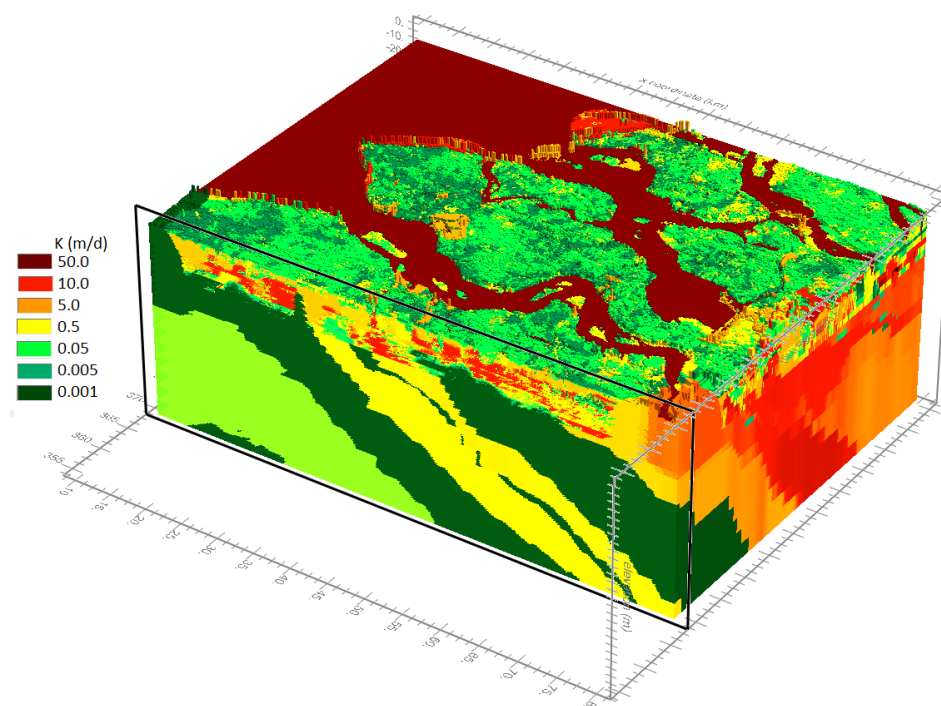
Voor de geohydrologische basis van het Zeeland model is de bovenkant van de Rupel formatie gekozen. Deze basis wordt als ondoorlatende laag beschouwd. In een groot deel van het modelgebied ligt de geohydrologische basis dieper dan -137 m NAP; hier wordt de modelrand op -137 m NAP gebruikt als ondoorlatende basis. Deze keuze is legitiem: door aanwezige kleilagen met hoge hydraulische weerstand 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.

Op de grens met België is de gemiddelde stijghoogte per laag uit het oude volledig gekalibreerde Zeeland model opgenomen. Deze stijghoogte is vastgezet. 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 in dit gedeelte een vaste gemiddelde neerslag, drainage en waterlopen overgenomen uit het Landelijk Hydrologisch model. Deze data sluit voor de waterlopen niet aan op de dataset van Waterschap Scheldestromen. Wel is deze data van voldoende kwaliteit om de grondwaterflux vanuit dit gebied te simuleren.

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

De combinatie van lithoklasse en geologische eenheid is belangrijk om een vertaling te kunnen maken naar de horizontale en verticale hydraulische conductiviteit van de cellen. Per combinatie van geologische eenheid en lithoklasse is een vaste waarde voor  $K_h$ ,  $K_v$  gehanteerd voor de GeoTOP dataset, gebaseerd op (Stafleu & Gunnik, 2016) (Figuur 16). Het resultaat is een 3D parametrisatie van hydraulische conductiviteiten voor het grondwatermodel.

Uiteraard zijn de schattingen in de tabel onderhevig aan onzekerheden. De variatie binnen een geologische eenheid met een bepaalde lithoklasse is namelijk groot. Ook is het moeilijk om ex-situ doorlatendheidsmetingen uit te voeren. De schattingen bieden daarmee ook slechts een eerste weergave van doorlatendheden. Bij kalibratie kunnen binnen een bepaalde bandbreedte deze doorlatendheden worden aangepast.

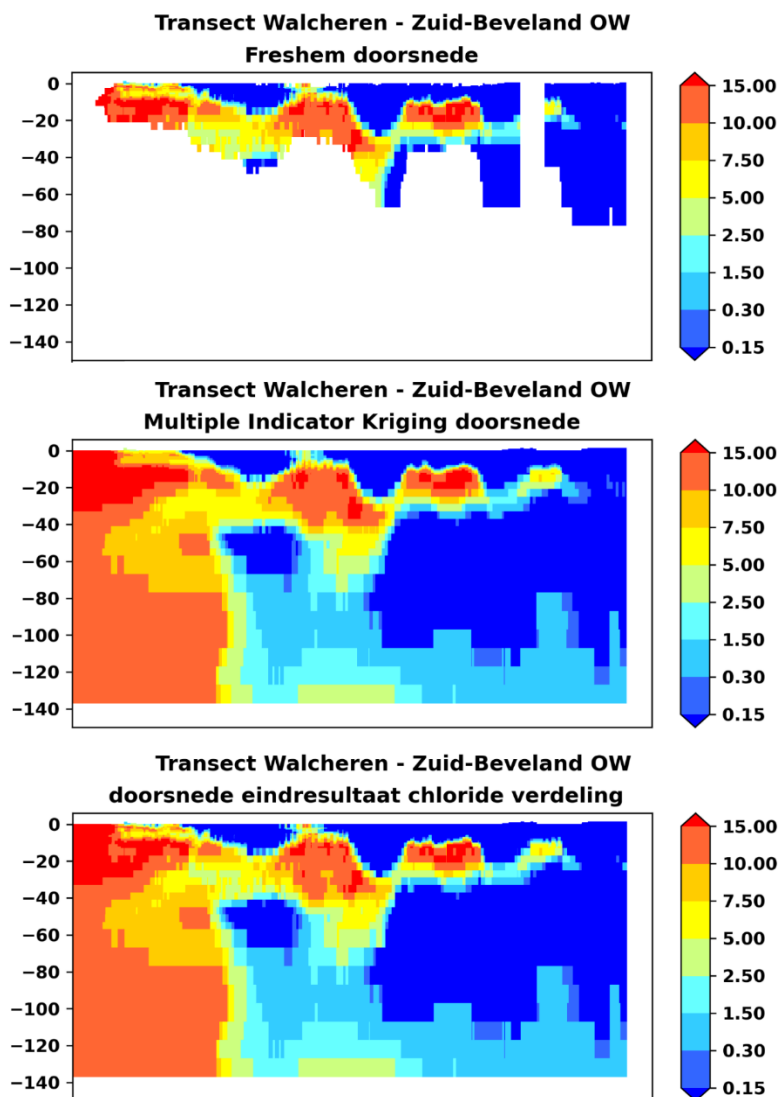


Figuur 16 De geologie vertaald naar het numerieke model.

### 3.7 Chloride concentratie verdeling in het grondwater

Een belangrijke update voor het grondwatermodel Zeeland is de implementatie van de FRESHEM data als huidige chlorideverdeling (zie hoofdstuk 2.3). Het 3D-FRESHEM model van de chlorideverdeling bestaat uit cellen van 100x100x0.5 meter en heeft een bereik van +24.0 m NAP tot -171 m NAP.

De FRESHEM data beslaat niet het hele modelgebied in de diepte. Er zitten zogezegd gaten in de data die moeten worden opgevuld om een modeldekkende initiële chlorideverdeling te krijgen. Daarom is ervoor gekozen om de chloridemetingen opnieuw te interpoleren voor de ondergrond in 3D en ook voor het oppervlaktewatersysteem (Zie Figuur 17).



*Figuur 17 Boven: Doorsnede Freshem chloride verdeling. Midden: Doorsnede chloride verdeling na Multiple Indicator Kriging, Onder: gebieden waar Freshem geen data heeft zijn opgevuld met de Multiple Indicator Kriging interpolatie.*

De metingen zijn recent verzameld voor de interpolatie van chloridemetingen voor heel Nederland binnen de studie NHI zoet-zout (Delsman et al., 2020). Ook de interpolatiemethode uit deze studie is hier toegepast.

Voor de interpolatiemethode is gebruik gemaakt van de techniek Multiple Indicator Kriging. Bij Multiple Indicator Kriging wordt rekening gehouden met zowel de afstand tussen de datapunten als de clustering. De chloridemetingen zijn verre van normaal verdeeld. De zoete metingen zijn sterk oververtegenwoordigd. Ook zoute metingen komen relatief vaak voor. Brakke metingen zijn sterk ondervertegenwoordigd.

Bij Multiple Indicator Kriging worden de chlorideconcentraties opgeknipt in een aantal klassen, de zgn. Indicators. Voor iedere klassengrens wordt op de te schatten locatie de kans bepaald dat de chlorideconcentratie boven of onder deze klassengrens ligt. Op deze manier worden zoete en zoute gebieden zo min mogelijk 'versmeerd' tot een brak geheel. Door de berekende kansen vervolgens samen te nemen wordt voor iedere locatie een complete statistische kansverdeling van de chlorideconcentratie samengesteld. In deze techniek kan ook de meetonzekerheid pragmatisch worden meegenomen, doordat deze onzekerheid mede de kans bepaalt of de chlorideconcentratie van een meting boven of onder een klassengrens ligt (Delsman et al., 2020).

Voor een uitgebreide beschrijving van de interpolatiemethode die resulteert in de chloride verdeling van de ondergrond uit metingen wordt verwezen naar (Delsman et al., 2020).

### 3.8 Onttrekkingen

In het model zijn onttrekkingen opgenomen. Hierbij zijn zowel grote onttrekkingen als kleinere onttrekkingen opgenomen. De dataset met informatie over onttrekkingen komt uit het Landelijk Grondwater Register (LGR). Het LGR vormt een landelijke registratie van alle grondwatervergunningen- en meldingen voor grondwater onttrekkingen, infiltraties en open bodem energie systemen in Nederland. De informatie over de onttrekkingen wordt op basis van locatie ( x coördinaat en y coördinaat), diepte ( bovenkant filter en onderkant filter) en debiet aan het model toegekend met behulp van het modelinstrumentarium.

Het modelinstrumentarium is er op ingericht dat updates in het Landelijk Grondwater Register (LGR) eenvoudig kunnen worden doorgevoerd in het Zeeland model.

Als de doorlatendheid van de cel niet groot genoeg is en er een groot debiet uit wordt onttrokken ontstaan er sterke over en onderschattingen van de stijghoogte. In het ergste geval convergeert het model niet meer. De onttrekking wordt daarom proportioneel verdeeld (in verticale richting) naar de doorlatendheid van een cel waar de onttrekking voor komt.

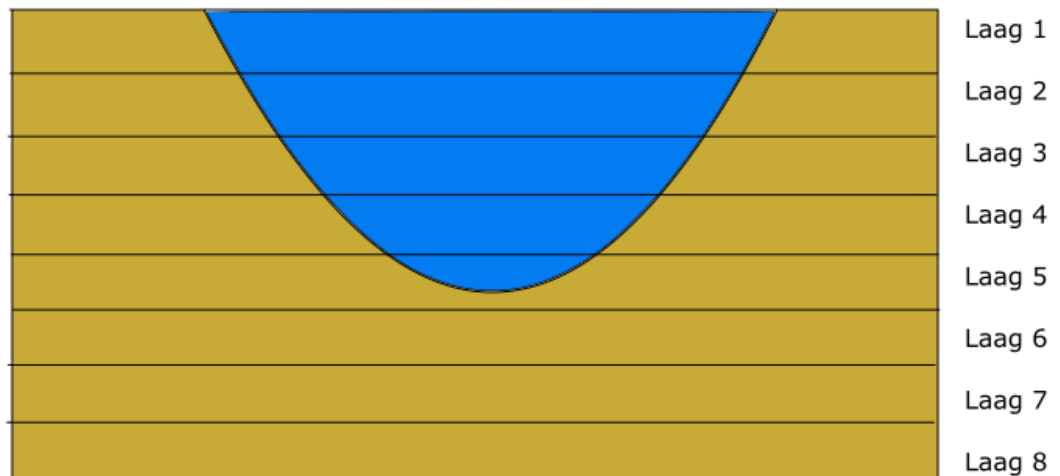
### 3.9 Oppervlaktewatersysteem

Waterlopen in het model zijn gebaseerd op leggergegevens van Waterschap Scheldestromen.

De legger bestaat uit de volgende shapefiles:

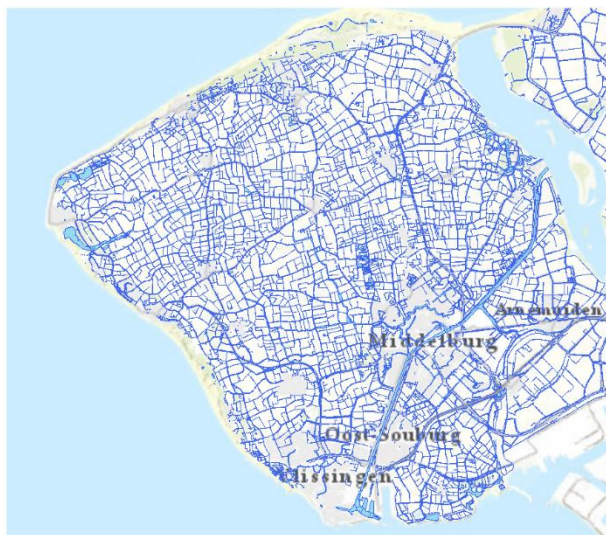
- Peilgebieden
- Watervlakten
- Afvoergebieden
- Afvoervakken
- Hydrovakken
- Bodemhoogte

Het bestand met peilgebieden bevat informatie over de verschillende peilgebieden met waterpeilen voor het zomer en winterhalfjaar. De bodemhoogte wordt gebruikt om de verschillende waterlopen toe te kennen aan de verschillende modellagen. Omdat de modellagen bovenin het model maar een halve meter dik zijn moeten de watergangen aan meerdere modellagen worden toegekend. In Figuur 18 ligt de bodem van een sloot in laag 5 en het maaiveld in laag 1. De sloot zou daarom in het model worden toegekend aan laag 1 tot en met 5. De conductance van de rivierbodem is hierbij gelijk verdeeld.



*Figuur 18 Schematische weergave van het toekennen van waterlopen op basis van het maaiveld en de bodemhoogte.*

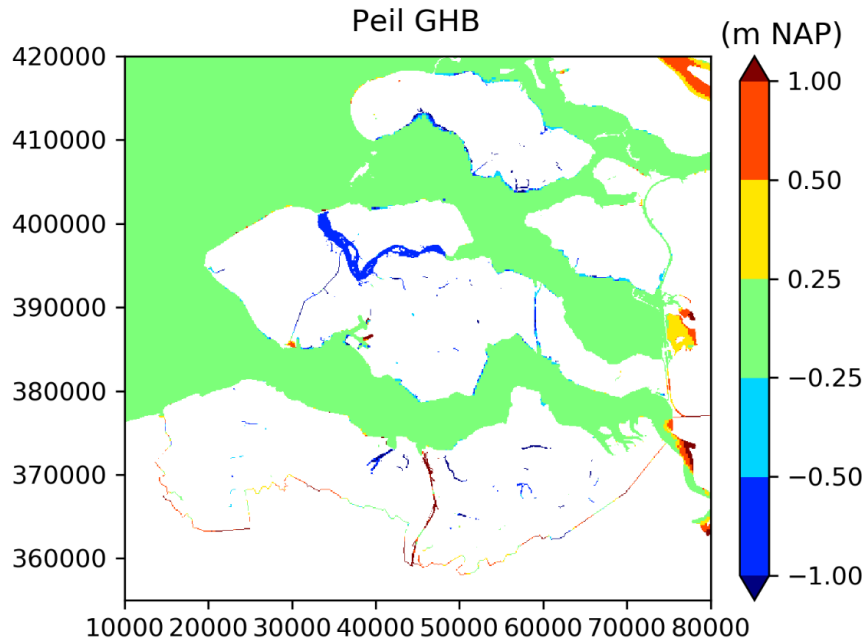
De lekweerstand van waterlopen is een belangrijke parameter voor de interactie tussen grond- en oppervlaktewater, maar ook moeilijk te meten en in modellen schaalafhankelijk. De conductance van de waterlopen is berekend door het oppervlak aan water in een cel te delen door een lekweerstand. Er is gekozen voor een lekweerstand van 20 dagen. Er is hierbij dus geen rekening gehouden met de soort ondergrond waar de watergang in ligt. Bij een uitgebreidere kalibratie is het raadzaam om de gevoeligheid van deze parameter verder te onderzoeken. Waterschap Scheldestromen is tevens bezig om in kaart te brengen welke waterlopen droogvallen in de zomer. Er is vooralsnog geen rekening gehouden met waterlopen die droogvallen in de zomer. Droogvallende waterlopen die als RIVER in het model zitten geven onjuiste infiltratie van oppervlaktewater en te hoge grondwaterstanden. Het meenemen van het droogvallen van waterlopen kan bijdragen aan de verbetering van de modelprestatie.



*Figuur 19 uitsnede waterlopen bestand van Waterschap Scheldestromen. In de figuur is het detailniveau van de data goed zichtbaar.*

### 3.9.1 Grote oppervlaktewateren

Voor grotere wateroppervlakken, meren en kanalen is de general head boundary package (GHB) toegepast. Een GHB is een randvoorwaarde waar een waterpeil aan kan worden toegekend. Hierdoor worden afhankelijk van dit peil fluxen gesimuleerd. Het peil voor kanalen komt uit het oude grondwatermodel Zeeland. Voor de Noordzee en de zeearmen is een peil van 0.0 m NAP aangehouden. Door een kleine weerstand op te geven voor de GHB kunnen de peilen in de grote watervlakken nagenoeg vast worden gezet. Het peil van de cellen waar de GHB actief is, is opgenomen in Figuur 20.



Figuur 20 Peil van cellen waar een General Head Boundary (GHB) actief is.

### 3.10 Drainage

Voor de drainage is gebruik gemaakt van de inputdata voor drainage uit het LHM. De input voor drainage uit het LHM is verschaald naar een resolutie van 100x100 meter. De drains zijn over de lagen verdeeld op basis van de diepteligging van de drain.

Het LHM maakt onderscheid tussen 3 type drainage:

- Buisdrainage
- Maaiveldgreppels
- Overland flow drainage

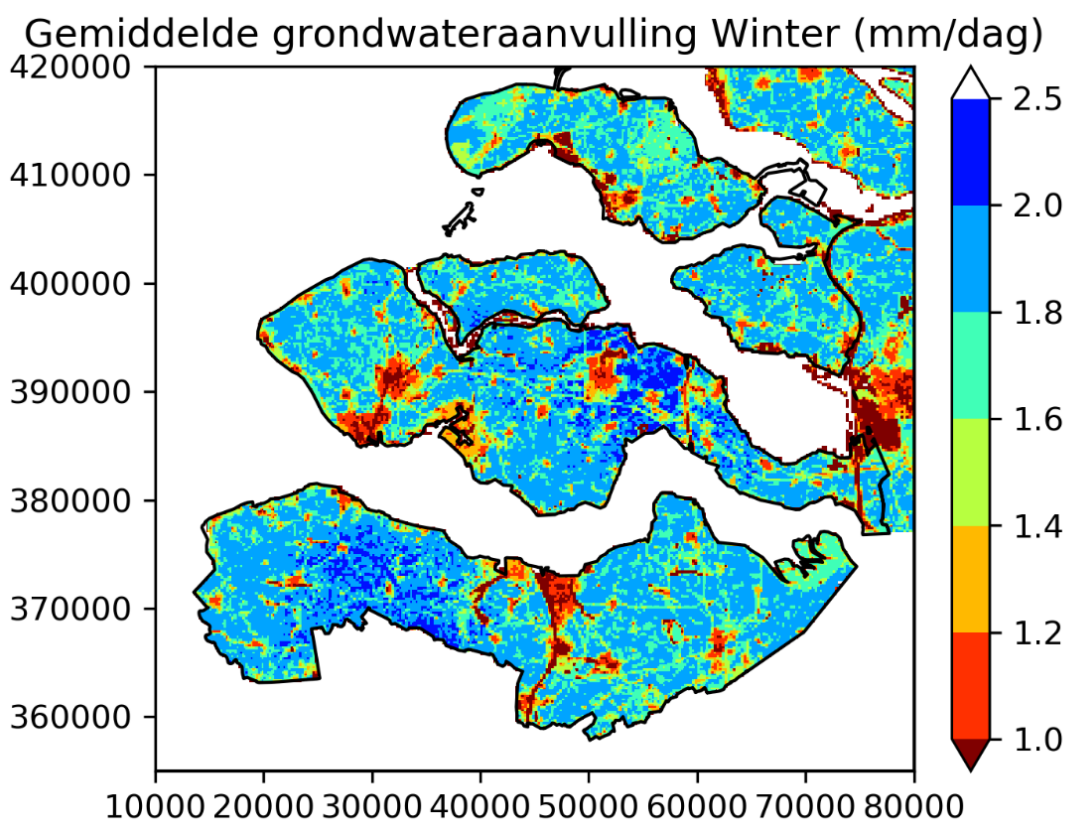
De 3 typen hebben elk een conductance en een drainageniveau. Het LHM kent niet overal drainage toe. Zo wordt afwatering in stedelijk gebied door het LHM niet via bovenstaande typen drainage afgehandeld. Er is daarom gekozen om overal op maaiveld drainage neer te leggen zodat het water kan worden afgevoerd.



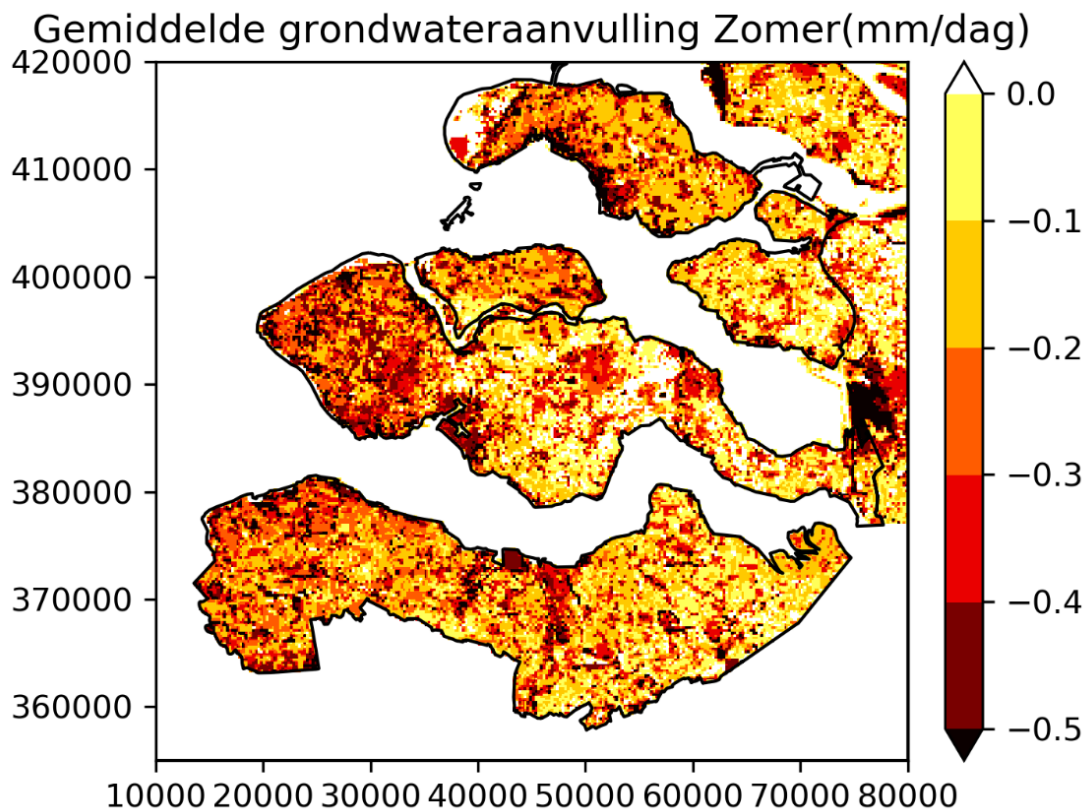
### 3.11 Grondwateraanvulling

Grondwateraanvulling is een invoerparameter voor het grondwatermodel. Het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) 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 MetaSWAP uitvoer van het LHM 3.4 model (consistent met NHI zoet-zout). MetaSWAP wordt in het LHM gebruikt om de onverzadigde zone te kunnen modelleren. De grondwateraanvulling voor het Zeeland model wordt berekend door de evapotranspiratie uit MetaSWAP af te trekken van de neerslag. Om te corrigeren voor bebouwd gebied wordt het resultaat vermenigvuldigd met de fractie van niet bebouwd gebied binnen een cel.

Voor de niet-stationaire run is de lengte per tijdstap 3 maanden. De tijdsperiode 2000-2018 is als basis gekozen en geëxtrapoleerd zodat het model een periode van 80 jaar kon doorrekenen. De reeks is zo geëxtrapoleerd dat de reeks van 2000-2018 opnieuw begint in 2019. De gemiddelde grondwateraanvulling in het winterhalfjaar en de gemiddelde grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar zijn opgenomen in Figuur 21 en Figuur 22.



Figuur 21 Langjarig gemiddelde grondwateraanvulling in het winterhalfjaar (okt – apr) over de periode 2000 – 2018 (mm/d).



*Figuur 22 Langjarig gemiddelde grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar (apr - okt) over de periode 2000 – 2018 (mm/d).*

## 4 Kalibratie en vergelijking met metingen

### 4.1 Kalibratiestappen

De volgende veranderingen zijn toegepast om de grondwaterstand, stijghoogte en stabiliteit van het zoet-zout grensvlak te verbeteren:

- De anisotropie in zandige pakketten is in plaats van 1.0 op 0.1 gezet. Dit zorgt voor een minder grote flux naar beneden waardoor de zoetwater lens minder snel groeit.
- De hydraulische conductiviteit van de bovenste laag is verhoogd naar minimaal 0.5 meter/dag. Om water van het perceel naar drains en sloten te laten stromen is het van belang dat de hydraulische conductiviteit van de bovenste actieve laag niet te klein is.
- Tijdstap van jaarlijks naar kwartaal. Het aanpassen van de tijdstapgrootte heeft als voordeel dat de seizoenen kunnen worden meegenomen in de modellering. Dit komt de stabiliteit van de zoet-zout verdeling ten goede. Bij een constante gemiddelde grondwateraanvulling groeien de zoetwaterlenzen over de tijd. Ook komt dit van pas wanneer seizoensale landbouwonttrekkingen in vervolgstudies moeten worden meegenomen.

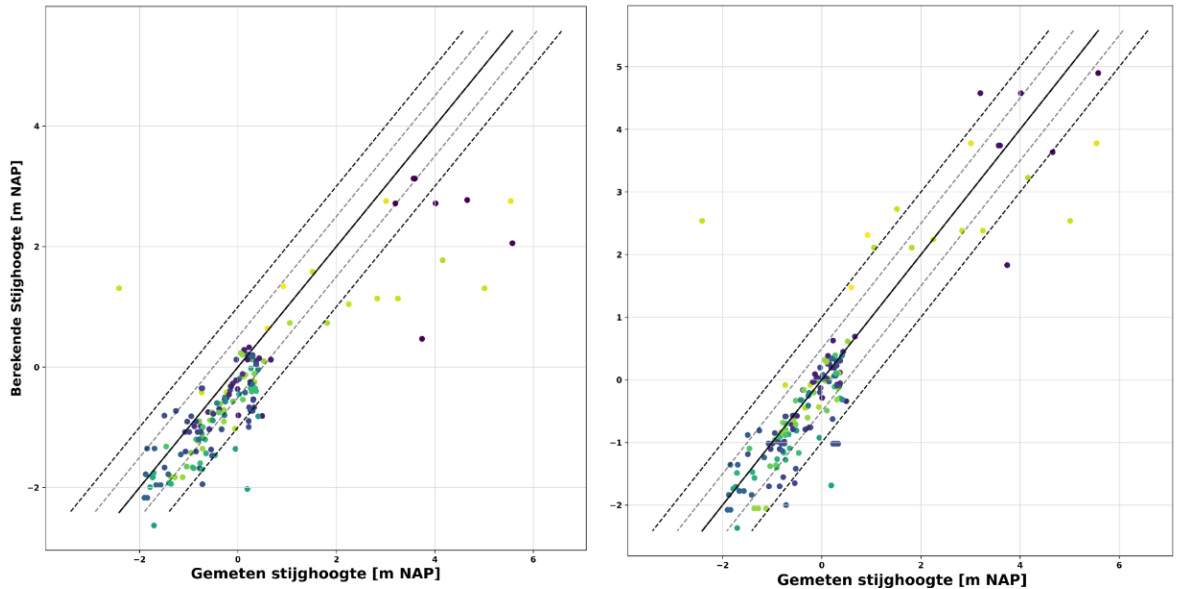
### 4.2 Resultaat initiële kalibratie

De berekende stijghoogte van het model is voor en na de uitgevoerde kalibratie vergeleken met stijghoogtemetingen na het jaar 2000 uit Dinoloket. Vervolgens is per locatie de gemiddelde gemeten stijghoogte en de gemiddelde berekende stijghoogte bepaald. De statistieken van de modelprestaties zijn weergegeven in Tabel 2. Het grondwatermodel van Zeeland dat in 2016 is opgeleverd is automatisch gekalibreerd (met PEST software) en heeft een gemiddelde fout van 28 cm. De gemiddelde fout van het Zeeland 2.0 model blijft hier vooralsnog bij achter. Het is daarom van belang dat het nieuwe model eerst volledig gekalibreerd wordt om het te kunnen toepassen in vervolgstudies.

Het resultaat van de fit tussen de berekende stijghoogte en de peilbuismetingen is weergegeven in de linker afbeelding van Figuur 23. Aan de rechterkant is de fit weergegeven tussen berekende stijghoogte en metingen nadat het model heeft gerekend met de aanpassingen die in hoofdstuk 4.1 zijn beschreven. Er is een duidelijke verbetering zichtbaar. Over het algemeen presteert het model wat beter bij relatief lage grondwaterstanden in de polders (tussen -2.0 – 2.0 m NAP) dan hogere grondwaterstanden in de duinen (> 2.0 m NAP).

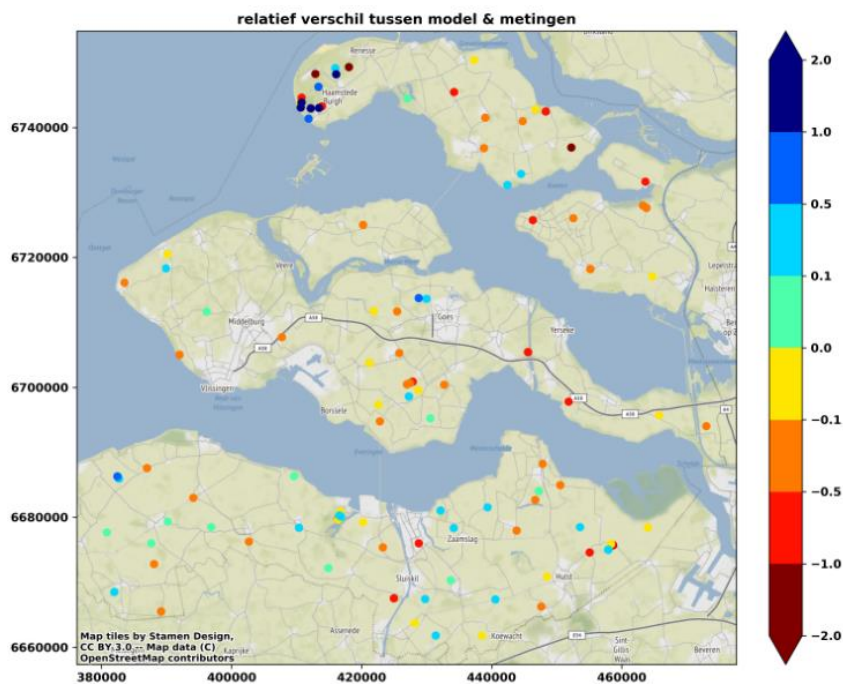
Tabel 2 Modelprestatie voor en na de kalibratiestappen

	Voor Kalibratie	Na initiële Kalibratie
<b>gemiddelde fout (cm)</b>	58	41
<b>mediaan (cm)</b>	39	21
<b>standaarddeviatie (cm)</b>	64	55
<b>variantie (cm)</b>	41	30



Figuur 23 Links: Berekende versus gemeten stijghoogte zonder de beschreven kalibratiestappen, Rechts: Berekende versus gemeten stijghoogte met de beschreven kalibratiestappen. De 1:1 lijn is in zwart weergegeven, de stippellijnen liggen op 50 centimeter van elkaar en dienen als referentie ten opzichte van de 1:1 lijn.

Daarnaast is een bollenkaart gemaakt voor het model na de initiële kalibratie. Het verschil is op de kaart in Figuur 24 weergegeven. De modelfout is over het algemeen het grootst bij de Kop van Schouwen. In de lager gelegen polders is de fout in de meeste gevallen minder dan 25 centimeter.



Figuur 24 Verschil in meter tussen de metingen en het model. Het is zichtbaar of het model de grondwaterstand onderschat (Blauw) of overschat (Rood).

## 5 Resultaten

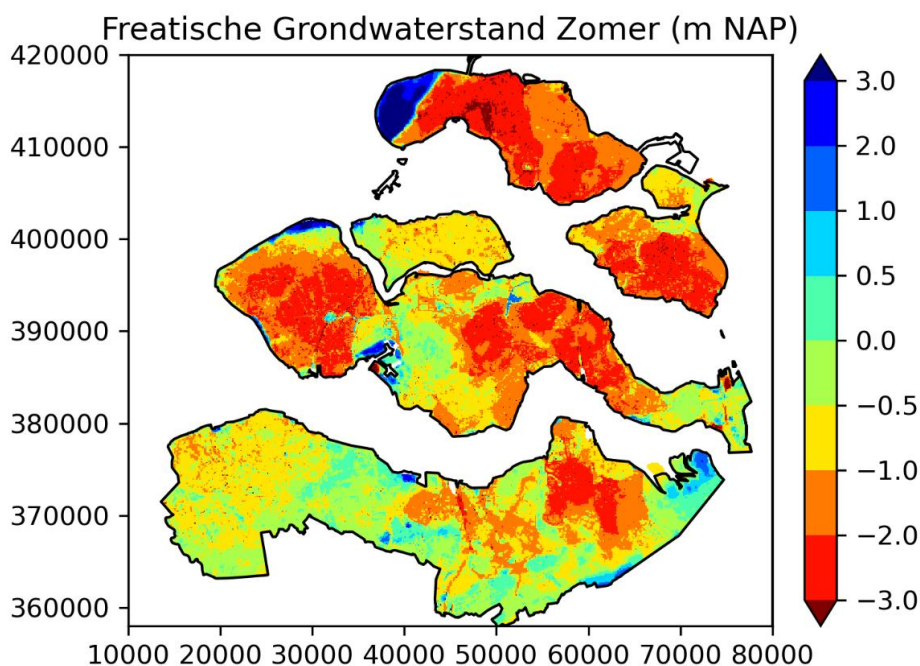
### 5.1 Inleiding

Het grondwatermodel van Zeeland is na de initiële kalibratie stappen zowel stationair als niet-stationair doorgerekend. De modeluitkomsten geven de chloride concentratie, grondwaterstanden/stijghoogtes, en fluxen over de tijd. Deze output is gebruikt om de volgende resultaten te kunnen weergeven:

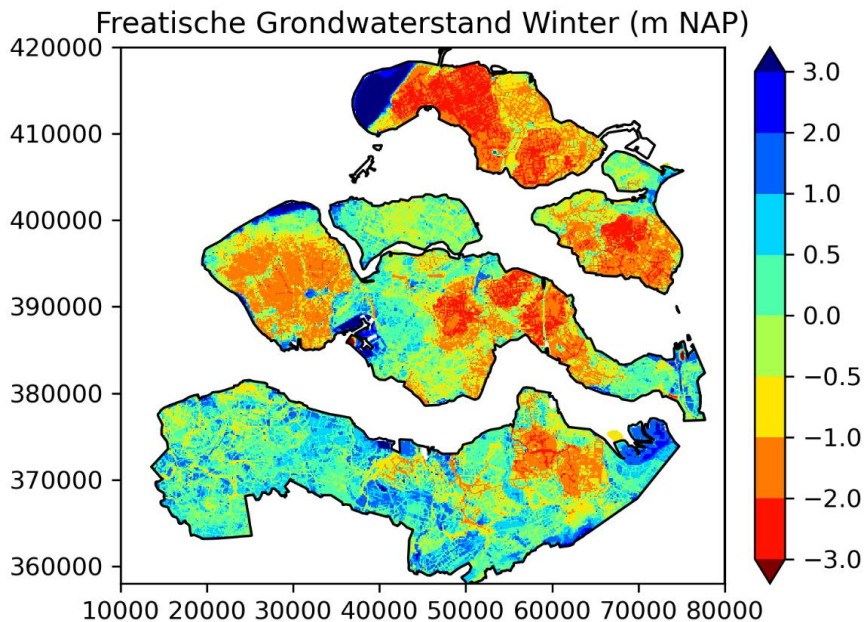
- Bovenaanzicht van de freatische grondwaterstand
- Bovenaanzicht van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket
- Doorsneden van de ontwikkeling van het zoet-zout grensvlak over de tijd
- Bovenaanzicht kwel en wegzijging naar maaiveld
- Zoutvracht in de polders

### 5.2 Freatische grondwaterstand

De freatische grondwaterstand in Zeeland fluctueert op basis van verschillen in neerslag, verdamping en variërende zomer- en winterpeilen in waterlichamen. Nederland kent een neerslagoverschot in de winter en een neerslagtekort in de zomer. Figuur 25 toont de (langjarig gemiddelde) freatische grondwaterstand in de zomer in m NAP. De dieper gelegen polders zijn uiteraard te herkennen aan de dieper gelegen grondwaterstand ten opzichte van NAP. Figuur 26 toont de (langjarig gemiddelde) freatische grondwaterstand in het winterhalfjaar. Hierin zijn de watergangen op enkele plaatsen zichtbaar omdat de grondwaterstand hier lokaal lager ligt dan in de directe omgeving.

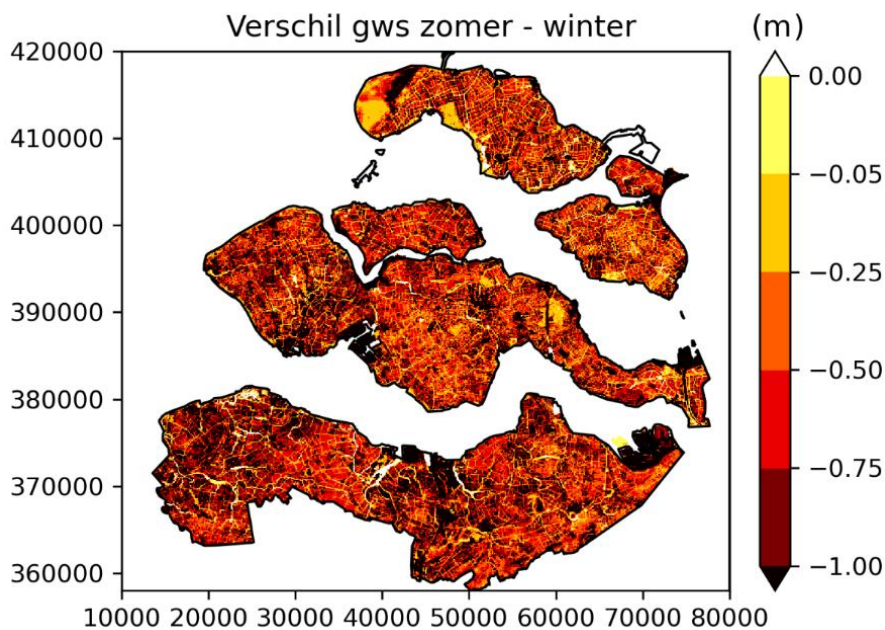


Figuur 25 Langjarig gemiddelde grondwaterstand in de droge periode (Zomer).



Figuur 26 Langjarig gemiddelde grondwaterstand in de natte periode (Winter).

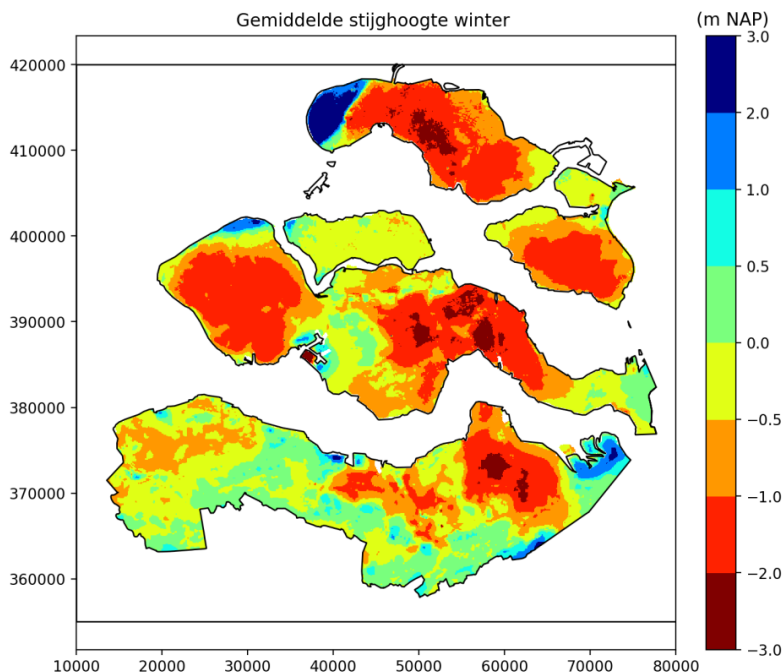
Figuur 27 geeft het verschil tussen de gemiddelde grondwaterstand in het zomerhalfjaar en in het winterhalfjaar. De grondwaterstand in het zomerhalfjaar ligt gemiddeld ongeveer 50 cm lager dan in het winterhalfjaar. De grootste verschillen komen over het algemeen voor in gebieden die buiten een peilgebied vallen (bijv. Het Verdronken Land van Saeftinghe). Verder zijn de verschillen het kleinst op locaties waar watergangen aanwezig zijn, en het zomer en winterpeil niet veel verschilt.



Figuur 27 Verschil in berekende freatische grondwaterstand tussen het zomerhalfjaar en het winterhalfjaar. Hoe donkerder de afbeelding hoe groter de grondwaterstands daling in het zomerhalfjaar.

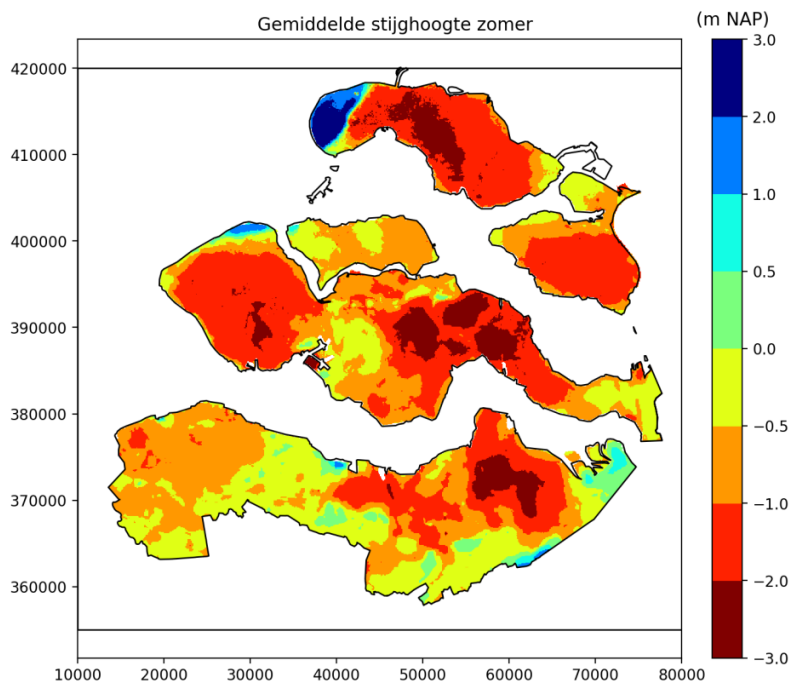
### 5.3 Stijghoogte 1<sup>e</sup> watervoerende pakket

Het grootste gedeelte van Zeeland is bedekt door een Holocene deklaag. Onder de Holocene deklaag liggen op de meeste plaatsen Pleistocene zanden die het eerste watervoerende pakket vormen. In Figuur 28 is de gemiddelde stijghoogte opgenomen in het winterhalfjaar op een diepte van -15 m NAP. De stijghoogte geeft een homogener beeld dan de freatische grondwaterstand omdat lokale verschillen aan het oppervlak naar de diepte toe worden meer worden uitgesmeerd.



Figuur 28 Gemiddelde langjarige stijghoogte in het winterhalfjaar op een diepte van -15.0 m NAP.

Figuur 29 toont de gemiddelde stijghoogte in het zomerhalfjaar op een diepte van -15 m NAP. De stijghoogte in het zomerhalfjaar ligt lager dan in het winterhalfjaar omdat het neerslagtekort in het zomerhalfjaar doorwerkt naar de dieper gelegen lagen.



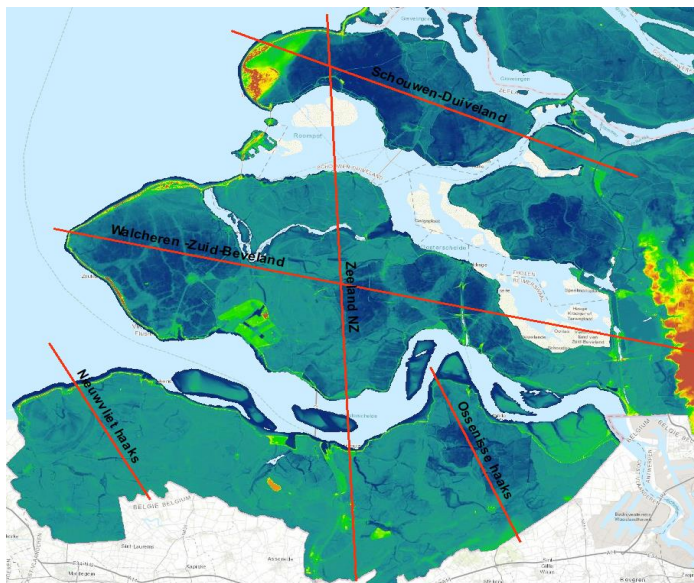
Figuur 29 Gemiddelde langjarige stijghoogte in het zomerhalfjaar op een diepte van -15.0 m NAP

## 5.4 Chloride verdeling

De huidige chloride verdeling in de Zeeuwse ondergrond is dankzij het FRESHEM project op gedetailleerde schaal beschikbaar. Om de stabiliteit van het model te bepalen kan worden gekeken naar de ontwikkeling van de chlorideverdeling over de tijd. De verwachting is namelijk dat wanneer de randvoorwaarden gelijk blijven, de zoet-zout verdeling ook grotendeels gelijk zal blijven. Op dit moment is de zoet-zout verdeling in Zeeland waarschijnlijk nog niet overal in evenwicht met de randvoorwaarden (Lebbe et al., 2012). Dit draagt bij aan de onzekerheid van het model.

Wel kan worden gekeken naar grote verschillen in de zoet-zout verdeling over de tijd, die kunnen duiden op modelafwijkingen of te lokale processen voor FRESHEM.

Om de chlorideverdeling over de tijd te analyseren is het Zeeland model 80 jaar niet-stationair doorgerekend. Een 5-tal doorsneden toont de chlorideverdeling op  $t = 0$  jaar (FRESHEM verdeling),  $t = 20$  jaar,  $t = 40$  jaar,  $t = 60$  jaar en  $t = 80$  jaar. De locaties van de doorsneden is in Figuur 30 weergegeven.



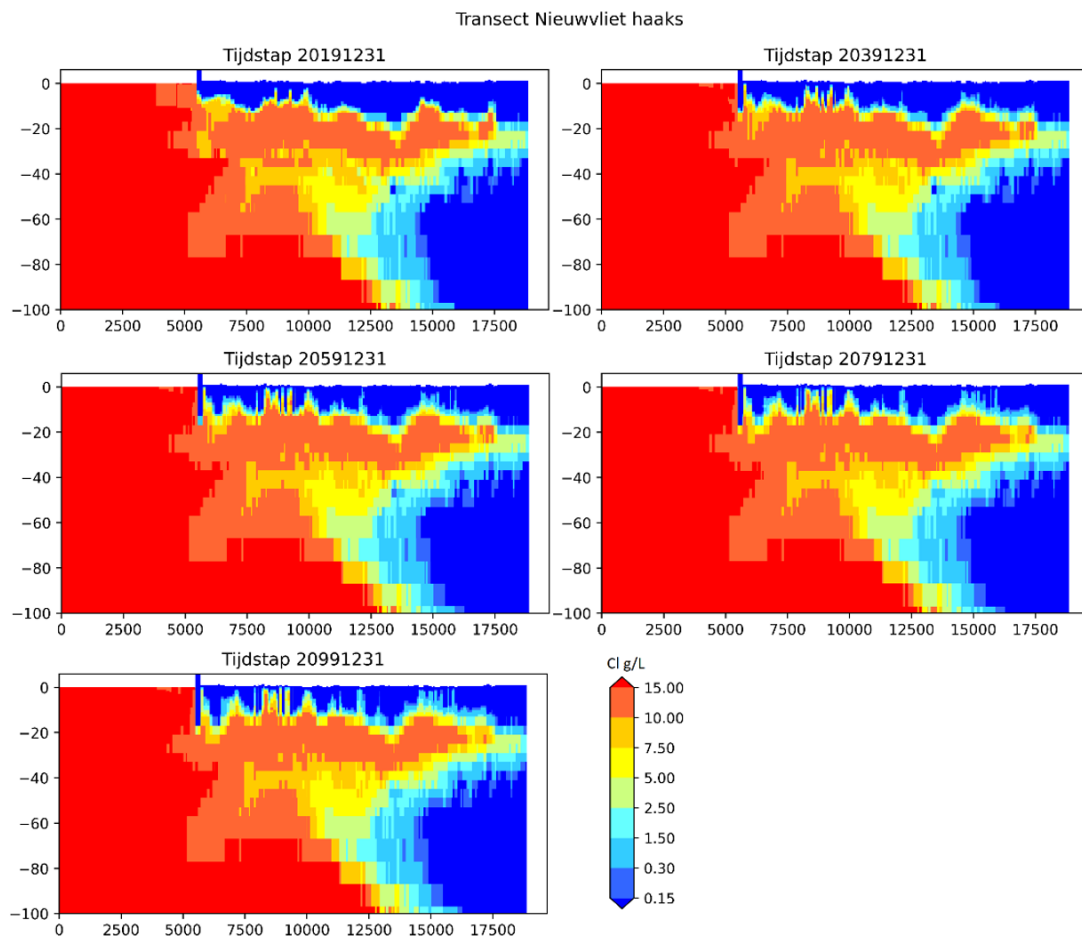
Figuur 30 Locaties van de 5 doorsneden die zijn gekozen om de chlorideverdeling over de tijd te visualiseren.

### 5.4.1 Transect Nieuwvliet haaks

De doorsnede haaks op de kustlijn bij Nieuwvliet is in de onderstaande figuur opgenomen. Een zoetwaterlens met een variabele dikte van 10 – 20 meter is te herkennen op  $t=0$  (tijdstep = 20191231). Onder deze lens bevindt zich een brakke zone tot ca. -40 m NAP. Verder naar de diepte wordt het gebied landinwaarts steeds zoeter. Tussen  $x = 7500$  en  $x = 10.000$  meter zijn op  $t = 0$  een drietal plaatsen aan te wijzen waar brak grondwater dichterbij het oppervlak aanwezig is.

Over het algemeen is de zoet-zout verdeling stabiel door de tijd. Op deze plaatsen is lokaal sprake van upconing. Op  $t=20$  jaar (Tijdstep 20391231) is de upconing op deze locaties toegenomen. Op  $t = 40$  jaar (Tijdstep 20591231),  $t = 60$  jaar (Tijdstep 20791231) en  $t=80$  jaar (Tijdstep 20991231) is het aantal locaties waar upconing lokaal optreedt toegenomen. De diepte van het zoet-zout grensvlak blijft hierbij gelijk op ca. -15 m NAP.

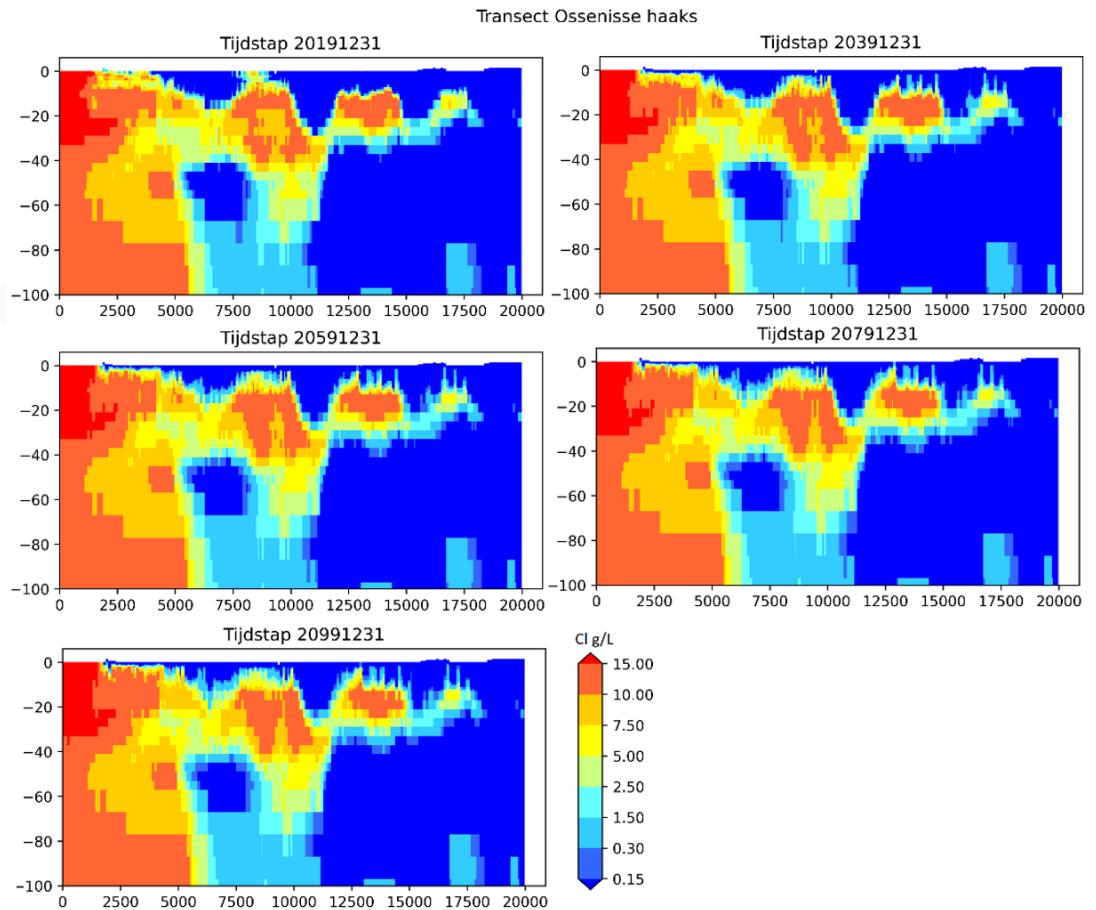




*Figuur 31 Chlorideverdeling voor transect Nieuwvliet op  $t=0$  (links boven),  $t=20$  jaar (rechts boven),  $t=40$  jaar (links midden),  $t=60$  jaar (rechts midden) en  $t=80$  jaar (links onder)*

#### 5.4.2 Transect Ossensisse haaks

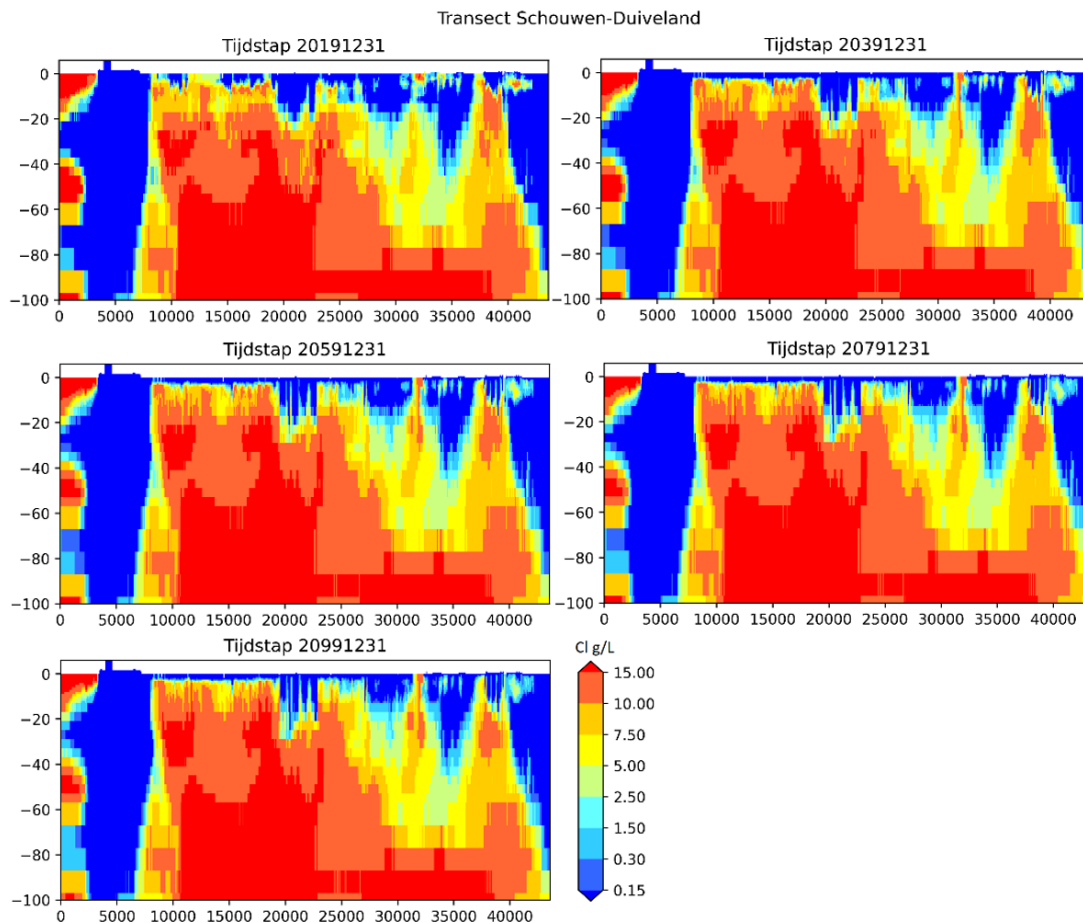
De doorsnede haaks op de kustlijn bij Ossensisse is in de onderstaande figuur opgenomen. In de figuur is de zoetwaterlens sterk variabel in dikte. In de dieper gelegen polders van het transect (zie Figuur 32) is de zoetwater lens niet aanwezig. In het midden van de doorsnede is de zoetwaterlens ca. 25 meter dik. De diepte van het zoet-zout grensvlak blijft van  $t=0$  tot  $t=80$  ongeveer gelijk. Wel moet worden geconcludeerd dat het aantal locaties en hoeveelheid upconing toenemen. In de toekomst zal aan de hand van metingen moeten worden getoetst of de upconing naar de polders en onder waterlopen ondergrootte wordt onderschat of overschat.



Figuur 32 Chlorideverdeling voor transect Ossensisse op  $t=0$  (links boven),  $t=20$  jaar (midden boven),  $t=40$  jaar (rechts boven),  $t=60$  jaar (links onder) en  $t=80$  jaar (rechts onder)

### 5.4.3 Transect Schouwen-Duiveland

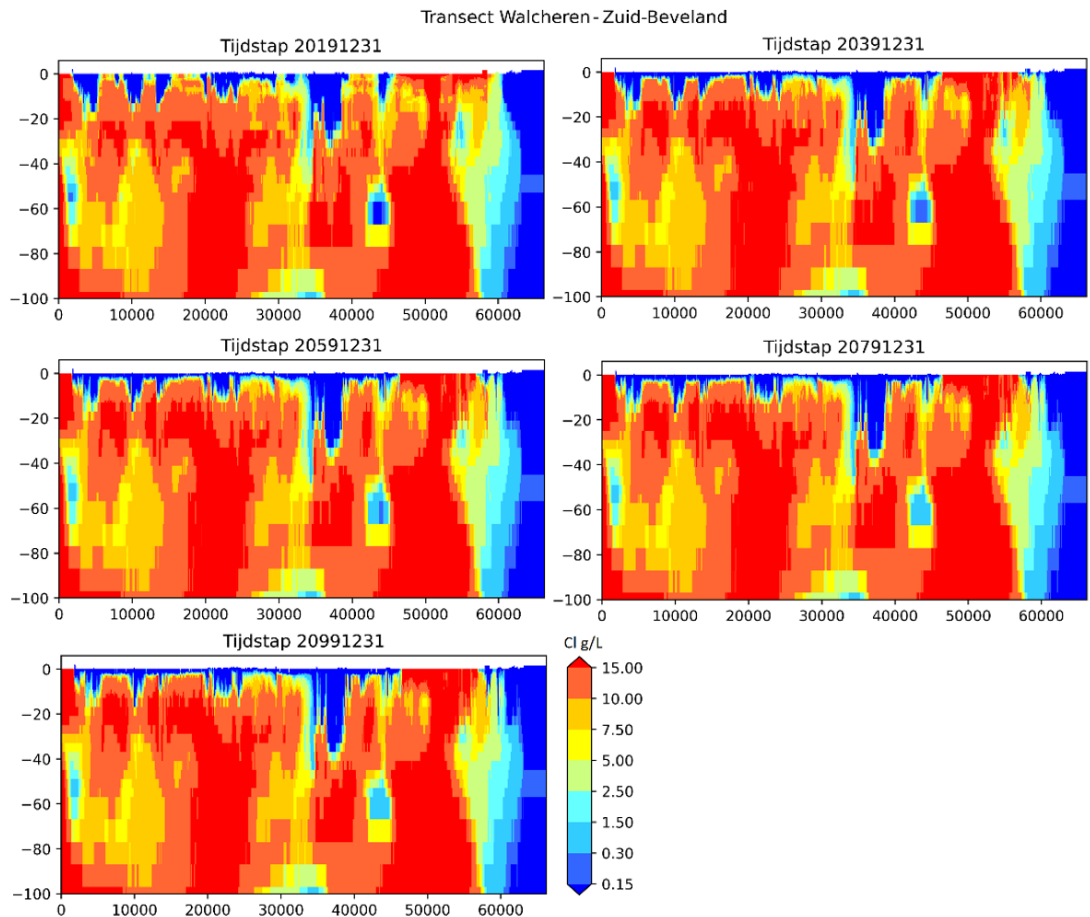
In de onderstaande figuur is van West naar Oost de doorsnede door Schouwen-Duiveland opgenomen. De zoetwater lens is op dit transect discontinu en ook sterk variabel in dikte. Aan de uiterste linkerzijde van het transect is op -40 en -70 m NAP zoet water offshore aanwezig volgens de interpolatie van de meetgegevens. Het lijkt onwaarschijnlijk dat hier 2.5 kilometer uit de kust zoet water op diepte aanwezig is. Verder onderzoek en nieuwe metingen zouden moeten uitwijzen of dit daadwerkelijk het geval is. De zoet-zout verdeling en de ligging van het zoet-zout grensvlak blijven van  $t=0$  tot aan  $t=80$  redelijk stabiel. Wat opvalt is dat de eerste actieve modellaag op  $t=20$  jaar bijna geheel zoet is geworden, waar op  $t=0$  de bovenste laag nog brak tot zout is. Dit is vooral goed te zien tussen  $x = 10.000$  m en  $x = 15.000$  m.



*Figuur 33 Chlorideverdeling voor transect Schouwen-Duiveland op t=0 (links boven), t=20 jaar (midden boven), t=40 jaar (rechts boven), t= 60 jaar (links onder) en t =80 jaar (rechts onder)*

#### 5.4.4 Transect Walcheren - Zuid-Beveland

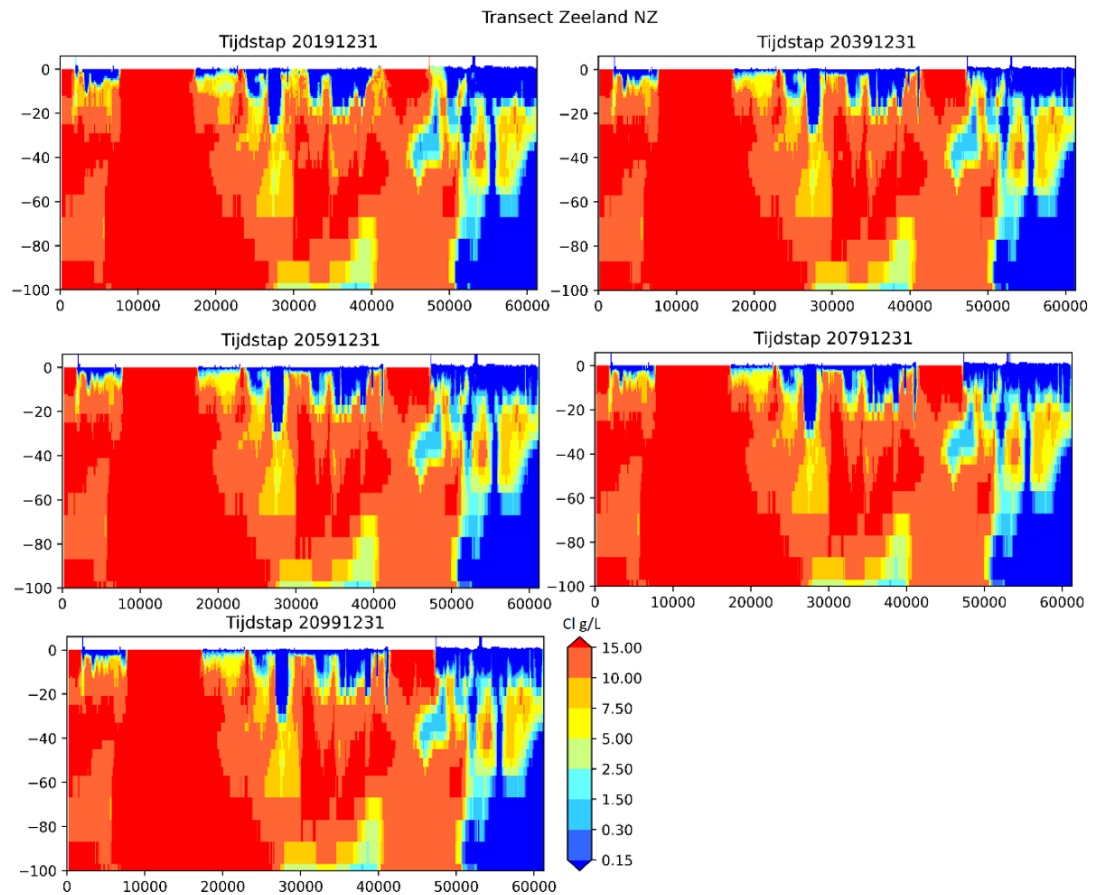
In Figuur 34 is het transect Walcheren – Zuid-Beveland opgenomen van t= 0 tot t=80 jaar. De doorsnede is over deze tijdperiode grotendeels stabiel. Wel kan worden opgemerkt dat de drie zoetwaterlenzen op t=0 en tussen x = 0 en x = 15.000 meter in volume afnemen. Het gaat hierbij zeer waarschijnlijk om een overschatting van de upconing van zout water richting het oppervlak door het model.



Figuur 34 Chlorideverdeling voor transect Walcheren – Zuid-Beveland op  $t=0$  (links boven),  $t=20$  jaar (midden boven),  $t=40$  jaar (rechts boven),  $t=60$  jaar (links onder) en  $t=80$  jaar (rechts onder)

#### 5.4.5 Transect Zeeland noord-zuid

Figuur 35 toont de ontwikkeling van de zoet-zout verdeling voor het transect Zeeland noord-zuid. Op  $t = 0$  (Tijdstap 20191231) is te zien dat de dikte van de zoetwater lens sterk varieert. Van  $t = 0$  tot  $t = 80$  jaar worden de zoetwater lenzen tussen  $x = 0$  en  $x = 25.000$  m kleiner. In het andere deel van het transect is de chloride verdeling over de tijd stabiel.



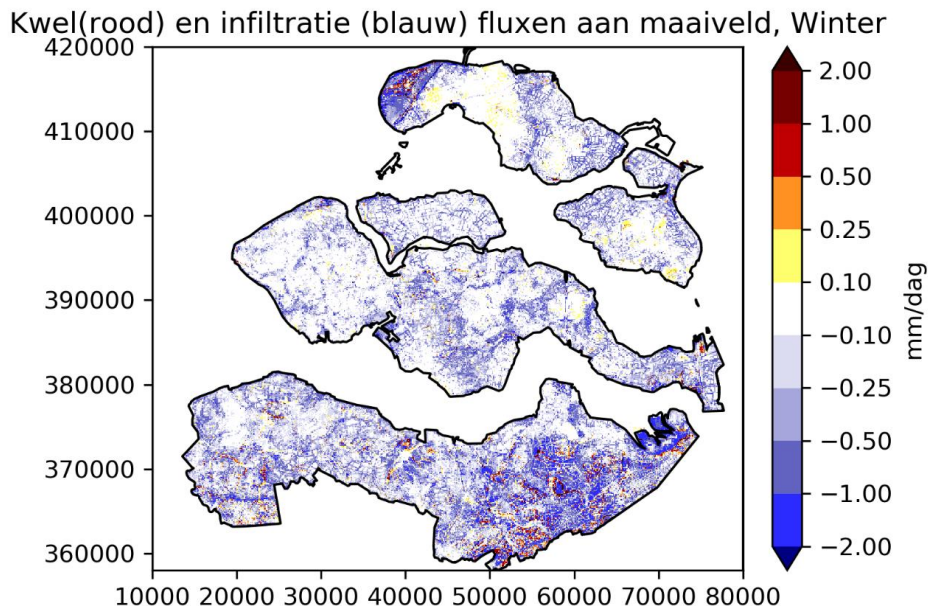
Figuur 35 Chlorideverdeling voor transect Zeeland noord-zuid op  $t=0$  (links boven),  $t=20$  jaar (midden boven),  $t=40$  jaar (rechts boven),  $t=60$  jaar (links onder) en  $t=80$  jaar (rechts onder)

## 5.5 Kwelfluxen

### 5.5.1 Kwel en infiltratie winterhalfjaar

Voor infiltratiegebieden is de infiltratie in het winterhalfjaar groter door het positieve neerslagoverschot. Hierdoor is de infiltratie aan maaiveld in de winter groter.

In de diepe polders is het verschil tussen de stijghoogte en de peilen van de sloten in de winter vaak groter dan in de zomer, omdat het winterpeil doorgaans lager is dan het zomerpeil. Stel het slootpeil in de polder ligt in de winter op 0,0 mNAP en in de zomer op 0,25 mNAP en de stijghoogte onder de deklaag is 0,5 mNAP. In die situatie is de kwelflux onder de sloten in de winter groter dan in de zomer.

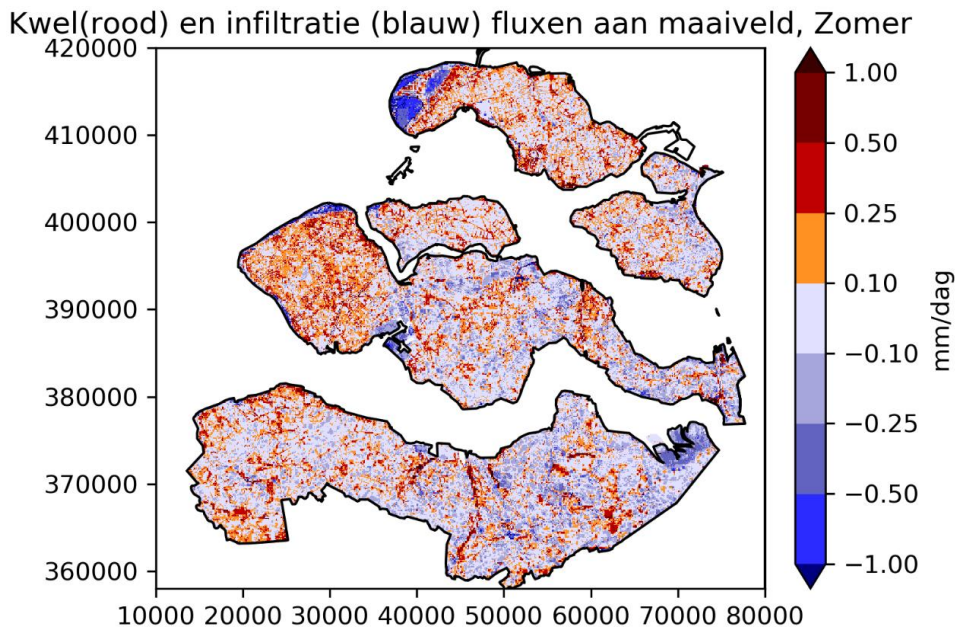


Figuur 36 Kwelfluxen aan maaiveld in het winterhalfjaar. Kwel (rood) en infiltratie (blauw) zijn in mm/dag

### 5.5.2

#### Kwel en infiltratie zomerhalfjaar

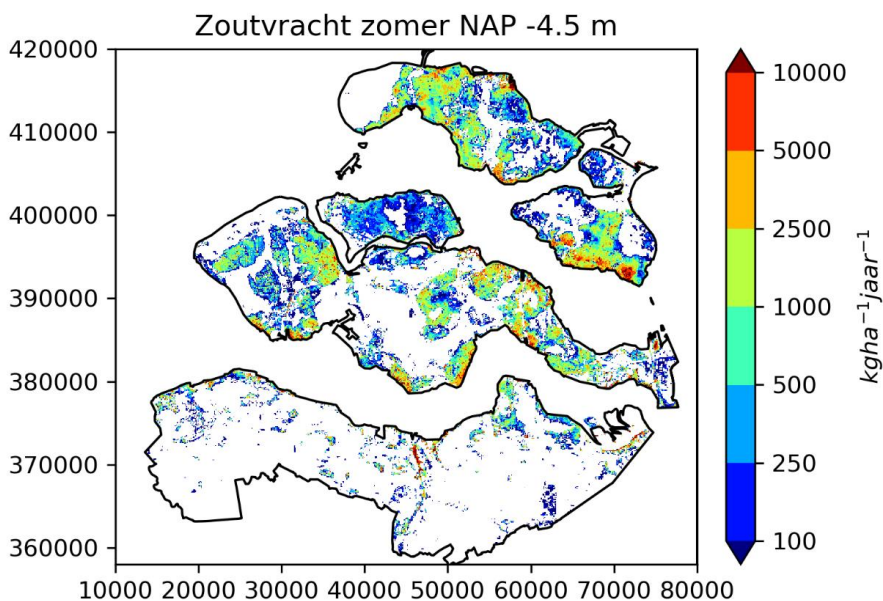
Het zomerhalfjaar kent overwegend een neerslagtekort, waardoor in het zomerhalfjaar weinig grondwateraanvulling optreedt. Door de lagere grondwateraanvulling in het zomerhalfjaar neemt de grondwaterstand af. De stijghoogte in het eerste watervoerend pakket wordt ook kleiner maar neemt echter minder af dan de grondwaterstand. Hierdoor neemt de kwel overwegend toe in kwelgebieden (Figuur 37). Onder sloten kan in de zomer de kwelflux minder groot zijn dan in de winter (zie paragraaf 5.5.1).



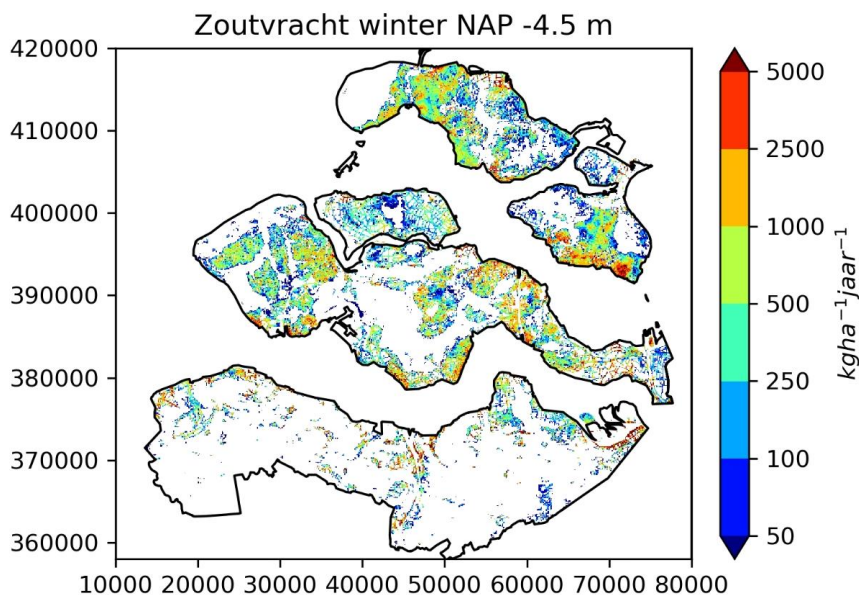
Figuur 37 Kwelfluxen aan maaiveld in het zomerhalfjaar. Kwel (rood) en infiltratie (blauw) zijn in mm/dag

## 5.6 Zoutvracht

De zoutvracht naar het oppervlakte is een belangrijke parameter in gebieden in Zeeland die te maken hebben met gewasschade door zoute kwel. De zoutvracht wordt berekend door de kwelflux te vermenigvuldigen met de chloride concentratie van het grondwater. De zoutvracht is het grootst in kwelgebieden van laag gelegen polders. Daarnaast is de kweldruk in het zomerhalfjaar vaak lager dan in het winterhalfjaar. Dit komt omdat het zomerpeil van sloten en watergangen in kwelgebieden in principe hoger ligt 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 zoutvracht in het zomerhalfjaar onder de deklaag vaak lager dan in het winterhalfjaar; dit is te zien als we kijken naar de zoutvracht op diepte (-4.5 m NAP) tussen de zomer en de winter (Figuur 38, Figuur 39).



Figuur 38 Zoutvracht in het zomerhalfjaar op een diepte van -4.5 m NAP.



Figuur 39 Zoutvracht in het winterhalfjaar) op een diepte van -4.5 m NAP

## 6 Conclusies en aanbevelingen toepassingen

### 6.1 Conclusie

#### **Doel: “Ontwikkeling van een prototype set van tools voor het vervaardigen van een generiek modelinstrumentarium”**

In dit project stond de ontwikkeling van een prototype set van tools voor het vervaardigen van een generiek modelinstrumentarium centraal. Het modelinstrumentarium dat specifiek voor de Provincie Zeeland is gemaakt is in staat om een 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel te genereren dat stationair en niet-stationair zoet-zout transport kan doorrekenen.

In het verleden werden modellen met losse tools en handmatige aanpassingen gemaakt. Dit legt veel druk op het beschrijven van de workflow. Bovendien, wanneer de modelleur zijn eigen stappen kan volgen hoeft dit echter niet te betekenen dat iemand anders het model vanuit de input data kon opbouwen. Deze manier van werken komt uiteindelijk niet ten goede aan de reproduceerbaarheid en transparantie van de modellen. Bovendien bestaat het maken van een grondwatermodel uit verschillende repetitieve stappen. Deze workflow is nu in zijn geheel geautomatiseerd. Het doorrekenen van verschillende klimaatscenario's of deelmodellen vereist nu minder aanlooptijd

#### **Doel: “Realiseren van een zoet-zout model voor de gehele Provincie Zeeland, gebaseerd op tools”**

Het vervolgens relatief snel genereren van een geactualiseerd zoet-zout grondwatermodel voor de Provincie Zeeland was een van de hoofddoelen. Hierbij is in samenwerking met de Provincie en Waterschap Scheldestromen gekeken welke inputdata uit het oude Zeeland model ge-update kon worden. De belangrijkste updates zijn de implementatie van de GeoTOP karakterisatie van de ondergrond en de FRESHM data voor de initiële chlorideverdeling van de ondergrond.

#### **Doel: “Consistentie in procedures, methodiek en data-management voor het regionale Zeeland model”**

Het instrumentarium is qua methodiek waar mogelijk gelijk gehouden met het nationale zoet-zout modelinstrumentarium. Dit zorgt ervoor dat data via het NHI kan worden aangeleverd en tegelijk kan worden doorgevoerd in het nationale model en het regionale model voor Zeeland. Updates kunnen voortaan relatief eenvoudig en snel worden doorgevoerd in het Landelijk Hydrologisch Model en het Zeeland model.

### 6.2 Aanbevelingen

- Zoals eerder beschreven is het noodzakelijk om een uitgebreide kalibratie uit te voeren voordat men het model kan gebruiken om scenario's door te rekenen. Verder is het noodzakelijk om na kalibratie van het model te onderzoeken of het resultaat van een lokale uitsnede van het model net zo goed presteert als het gekalibreerde model.
- Naast een kalibratie op basis van stijghoogte is het raadzaam om het model te toetsen op fluxen en op zoutvrachten in de polders. De chlorideconcentratie van het afgevoerde water wordt per gemaal gemeten. Waterschap Scheldestromen heeft deze informatie aangeleverd. Het is niet exact bekend welk gebied door de betreffende gemalen wordt bediend en hoe dat gegeven de omstandigheden in de tijd varieert. Daarom is de gemodelleerde zoutvracht nog niet getoetst aan de hand van de data van het waterschap.



- Waterschap Scheldestromen is bezig met een nieuwe inventarisatie welke sloten in de zomer droogvallen. Implementatie van deze gegevens kan het model verbeteren. Hierbij is het van belang om aan te sluiten bij de datastandaard van de unie van Waterschappen. Op die manier kan data eenvoudig worden geïntegreerd binnen het NHI.
- De onttrekkingen uit de LGR database zijn mogelijk verouderd. Waar mogelijk zou een update op de dataset kunnen worden doorgevoerd om te onderzoeken of er onttrekkingen moeten worden toegevoegd of dat onttrekkingen op dit moment niet meer actief zijn. Omdat landbouwonttrekkingen een meer incidenteel karakter hebben is het van belang om data te verzamelen over onttrokken volumes over een bepaalde periode in plaats van jaaropgaves. Binnen het NHI wordt op dit moment gewerkt aan het actualiseren en aanvullen van de NHI-onttrekkingendatabase.  
<http://www.nhi.nu/nl/index.php/uitvoering/actualisatie-onttrekkingen/>
- Het meenemen van het verloop van de waterpeilen in de zeearmen geeft een verbetering dan de huidige opgelegde vaste peilen in de zeearmen.
- Op dit moment is het voor iemand zonder programmeerervaring met het modelinstrumentarium een uitdaging om aanpassingen door te voeren. Het opleiden van mensen bij het waterschap, de provincie of de markt draagt bij aan een bredere inzetbaarheid van het model. Op dit moment wordt een cursus door Deltares ontwikkeld die belanghebbenden helpt de imod-python toolbox te gebruiken.
- Afhankelijk van de onderzoeksvragen en gewenste nauwkeurigheid zou het grondwatermodel Zeeland 2.0 kunnen worden uitgebreid met een koppeling met de onverzadigde zone.

### 6.3 Toepassingen

Enkele toepassingen van het grondwatermodel Zeeland 2.0 zijn hieronder beschreven. Dit is geenszins een uitputtende lijst, maar een verzameling van toepassingen die in samenwerking met Provincie en Waterschap zijn bedacht.

- Het uitbreiden van het onttrekkingsconsulent Zeeland. Het geohydrologische model Zeeland kan in combinatie met perceelmodellen het onttrekkingsconsulent naar een hoger niveau tillen ( fase 2). Daarin zou het effect van landbouwonttrekkingen (horizontale onttrekkingen) kunnen worden gevisualiseerd. Dit kan bijdragen bij het proces van vergunningsverstrekking. Ook voor ondernemers zelf zou de tool inzicht bieden in het effect van de onttrekking op de omgeving.
- Het doorrekenen van klimaatscenario's en zeespiegelstijgingen.
- In de scripts zijn wel verschillende tools opgenomen om relatief eenvoudig scenario's door te rekenen die de mogelijkheid tot zoetwater opslag in de ondergrond kunnen doorrekenen. Zo zijn de verschillende Go-Fresh technieken eenvoudig te implementeren en door te rekenen.
- Bij het maken van de prototype set van tools zijn verschillende mogelijkheden geïmplementeerd om ervoor te zorgen dat vanuit de basis inputdata verschillende modellen kunnen worden gegenereerd. Zo is het instrumentarium in staat om input te knippen en te verscalen naar gelang de wensen van de gebruiker qua domein en celgrootte. Dit zorgt ervoor dat er snel een model van een deelgebied kan worden opgesteld.

- Invloed van het gedeeltelijk terugbrengen van getij in het Grevelingenmeer. Het Grevelingenmeer ligt binnen het gebied waar twee regionale modellen ( provincie Zuid-Holland, provincie Zeeland) elkaar overlappen. Naast het bepalen van het effect van het getij, ligt er hier een interessante onderzoeksvraag. “Hoe goed/eenvoudig zijn 2 regionale modellen te combineren om een overlappende uitsnede te maken”. Dit zou dan bijvoorbeeld in een TKI project kunnen passen.

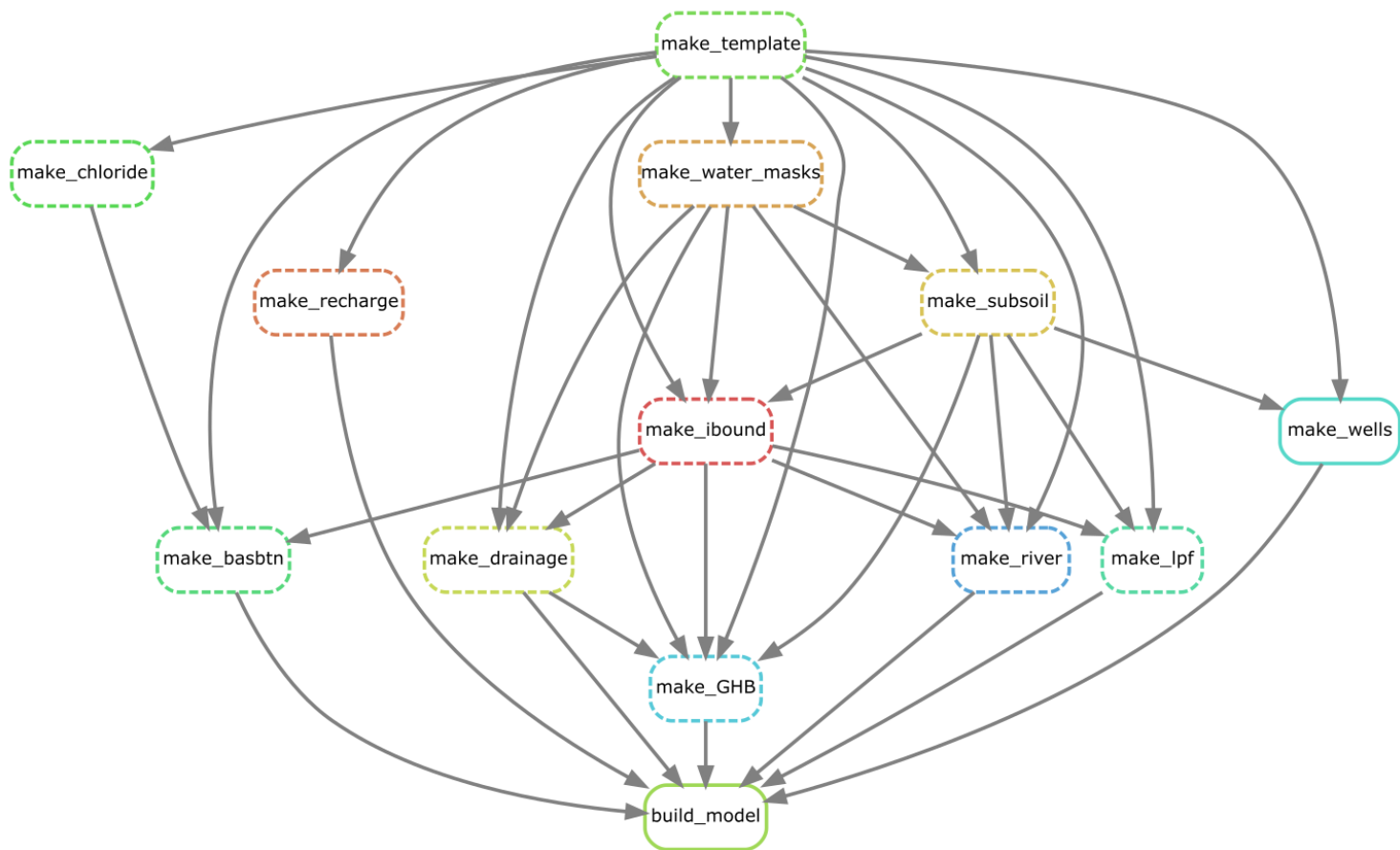
## 7 Referenties

- 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.
- 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., Oude Essink G.H.P., Janssen G.M.G.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.
- van Baaren, E. S., Delsman, J. R., Karaoulis, M. C., Pauw, P. S., Vermaas, T., Bootsma, H., et al. (2018). FRESHM Zeeland - FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland. Deltares report 1209220. Utrecht, Netherlands.
- 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., Oude Essink, G., Huizer, S., Bootsma, H., Mulder, T., Zitman, P., Romero Verastegui, B. & Janssen, G. (2020). Actualisatie zout in het NHI - Toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model. Deltares rapport 11205261-003-BGS-0001, Utrecht.
- Faneca Sánchez, M. and Oude Essink, G. H. P.: Effecten van een zouter Kanaal Gent-Terneuzen op het grondwater systeem., 2015.
- Harbo, M. S., Pedersen, J., Johnsen, R. and Petersen, K.: Groundwater in a future climate., 2011.
- Hummelman, J., Maljers, D., Menkovic, A., Reindersma, R., Vernes, R., Stafleu, J., (2019). Totstandkomingsrapport Hydrogeologisch model (REGIS II). TNO.
- 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.
- 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.
- 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., 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.: Saline seepage in deltaic areas, Vrije Universiteit Amsterdam., 2013.
- 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., 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 Van Vliet, M.: Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland, *Deltares 2008-U-R0322/A.*, 2008b.
- 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., 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., Pauw, P., Van Baaren, E., Zuurbier, K., De Louw, P., Veraart, J., McAteer, E., Van Der Schoot, M., Groot, N., Cappon, H., Waterloo, M., Hu-a-ng, K., Groen, M. 2018. Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening, GO-FRESH.
- 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., 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.
- van de Plassche, O.: Sea-level change and water-level movements in the Netherlands during the Holocene, VU University Amsterdam, Netherlands., 1982.
- Rummelen, F. V. (1965). Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1: 50.000. Blad Beveland.
- Soares, A., 1992. Geostatistical estimation of multi-phase structure. *Mathematical Geology* 24 (2), p.149-160.
- 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.

- Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F.S., Gunnink, J.L., Schokker, J., Dambrink, R.M., Hummelman, H.J., Schijf, M.L., 2012. GeoTOP modellering. TNO Rapport 2012 R10991, 216 p.
- Stafleu en Gunnink, TNO, 2016. Hydraulische parametrisering GeoTOP Zeeland.
- 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.
- Schultz, B.: Waterbeheersing van de Nederlandse droogmakerijen., 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., Van Doorn, T. H., Bierkens, M. F. P., Van Gessel, S. F., & De Heer, E. (2005). Van gidslaag naar hydrogeologische eenheid: toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II. TNO.
- 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.
- 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.
- 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.

# A Visualisatie van de correlatie tussen de modelscripts



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)