

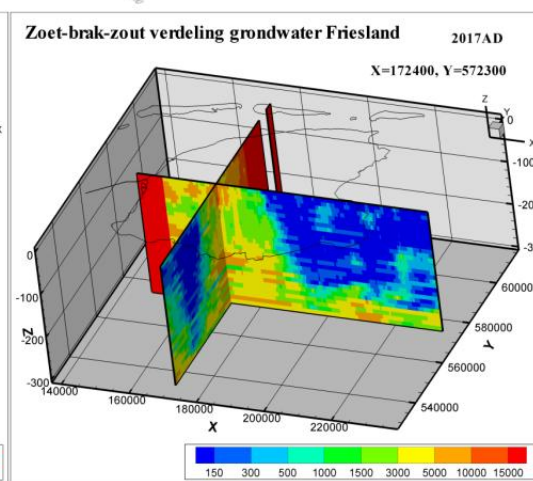
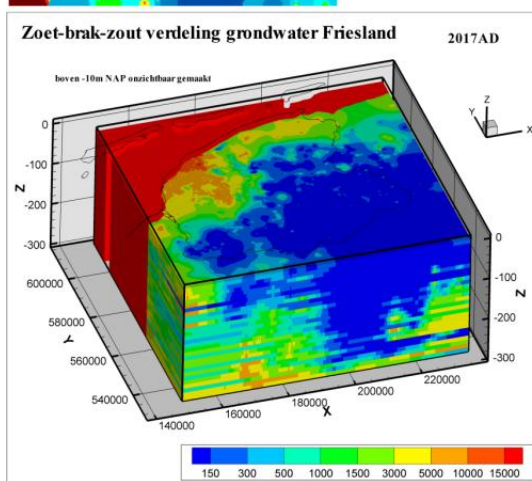
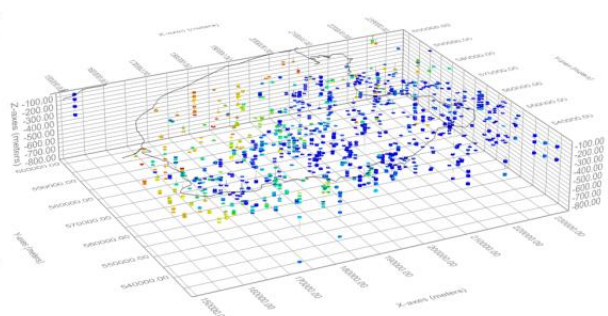
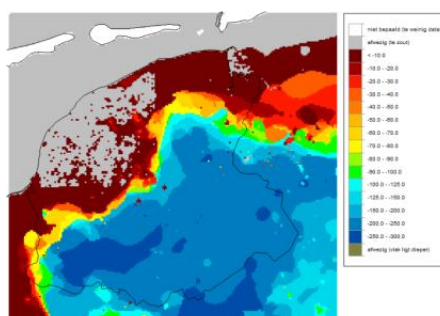
**Zoet-zout grensvlakkaarten  
grondwater in de Provincie  
Fryslân**





# Zoet-zout grensvlakkaarten grondwater in de Provincie Fryslân

Gu Oude Essink  
Andrea Forzoni



11201095-000



**Titel**

Zoet-zout grensvlakkaarten grondwater in de Provincie Fryslân

**Opdrachtgever**  
Provincie Friesland

**Project**  
11201095-000

**Kenmerk**  
11201095-000-BGS-0002

**Pagina's**  
24

**Trefwoorden**

Grondwater; zoet-zout verdeling; grensvlak kaarten zoet-brak en brak-zout; paleo-reconstructie.

**Samenvatting**

In opdracht voor de Provincie Fryslân heeft Deltares ten behoeve van de Brede Grondwaterstudie Fryslân de 3D zoet-zout verdeling van het grondwatersysteem in de provincie bepaald aan de hand van verschillende typen (indirecte) saliniteitsmetingen. Zoet-zout grensvlakkaarten zijn opgesteld die gebruikt worden in de parallelle studie naar de verandering in de zoet-zout verdeling in het grondwater tijdens paleo-hydrogeografische ontwikkeling van het Friese kustlandschap. In de rapportage is de data dichtheid per diepte en per type meting gecommuniceerd. De methode van interpolatie is kort uitgelegd. De 3D zoet-zout verdeling zijn gevisualiseerd aan de hand van een tweetal visualisatie technieken (iMOD en TECPLOT).

<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteur</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Review</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Goedkeuring</b>	<b>Paraaf</b>
	dec. 2017	Gualbert Oude Essink		Perry de Louw		M. Kuijper	
		Andrea Forzoni					

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Gebruikte databestanden</b>	<b>1</b>
2.1 Chloride analyses	2
2.1.1 Data uit DINOloket	2
2.1.2 Data van de Provincie Fryslân	3
2.1.3 Data van het Wetterskip Fryslân	4
2.1.4 Data van Vitens	4
2.2 VES-metingen	5
2.3 Boorgatmetingen	6
2.4 Airborne EM metingen zoet-zout verdeling	6
2.5 ECPTs van Fugro (niet gebruikt in deze analyse)	7
2.6 Saliniteitsmetingen in het oppervlaktewater	7
2.7 Data dichtheid per geselecteerde dieptes	8
<b>3 Gebruikte methode van interpolatie</b>	<b>9</b>
<b>4 Resultaten</b>	<b>11</b>
4.1 Zoet-zout verdeling in het grondwater van de Provincie Fryslân	11
4.1.1 iMOD visualisaties	11
4.1.2 TECPLOT visualisaties	12
4.2 Zoet-zout grensvlakkaarten	13
4.3 Discussie	15
<b>Case Flevoland</b> (Oude Essink et al., 2008)	16
<b>Case Waternet - Groot-Mijdrecht</b> (Delsman, 2015; Delsman et al., 2014b)	18
<b>Case FRESHEM Zeeland</b> (Van Baaren et al., 2016, 2017).	18
<b>5 Betrouwbaarheid van de kaarten</b>	<b>19</b>
<b>6 Referenties</b>	<b>21</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Initiële chloride concentratie verdelingen</b>	<b>23</b>





## 1 Inleiding

De aanleiding van deze opdracht is de Brede Grondwaterstudie Fryslân. Deze studie is door de Provincie Fryslân, Waterbedrijf Vitens N.V. en Wetterskip Fryslân geïnitieerd. Er is namelijk in Fryslân behoefte aan een structureel en gekwantificeerd inzicht in het functioneren van het Friese grondwatersysteem. Op basis van dit inzicht wil de Provincie aangeven waar huidige ontwikkelingen toe leiden en hoe de provincie ook op lange termijn verschillende typen gebruikers adequaat kan faciliteren. Hierbij wordt bijvoorbeeld in beeld gebracht op welke plaatsen duurzame grondwaterwinningen in de toekomst mogelijk zijn en in welke hoeveelheden.

Onderdeel van dit traject is het laten uitvoeren van een brede geohydrologische modelstudie. Producten van deze studie zijn: een geohydrologisch model (zowel kwantitatief als kwalitatief), een waterbalans van het grondwatersysteem van heel Fryslân, GxG-kaarten bij verschillende scenario's, een grondwatersysteemanalyse en kansenkaarten voor locaties waar grondwaterwinning mogelijk en/of gewenst wordt voor verschillende gebruikerstypen (zijnde bijvoorbeeld de drinkwatervoorziening voor industriële winningen, warmte/koude opslag-projecten (WKO) en mijnbouwactiviteiten).

Belangrijke invoer voor de brede geohydrologische modelstudie is de huidige 3D zoet-zout verdeling in het grondwater van de Provincie Fryslân. De in de geohydrologische modelstudie gesimuleerde zoet-zout verdeling wordt met deze 'werkelijke' verdeling vergeleken. Deltares heeft van de Provincie Fryslân de opdracht gekregen de huidige zoet-zout verdeling in het grondwater te bepalen.

De werkzaamheden bestaan uit:

1. het verzamelen van verschillende typen bestaande zoet-zout databestanden,
2. het toevoegen van nieuwe saliniteitsmetingen aan de bestaande database,
3. het compileren van één dataset met alle typen saliniteitsmetingen,
4. het interpoleren (en extrapoleren) van alle metingen tot een 3D verdeling,
5. het controleren van de resultaten en het oplossen van mogelijke mismatches in maximaal twee iteratieslagen,
6. het transformeren van de 3D zoet-zout verdeling naar zoet- zout grensvlakkaarten (waarden te bepalen in samenspraak met de Provincie),
7. een beschouwing over de betrouwbaarheid van daaruit voortkomende zoet-zout verdeling in het grondwater.

In deze memo beschrijven we de verschillende werkzaamheden kort. Ten slotte ter afbakening: de analyses vinden alleen plaats op het vaste land van de Provincie Fryslân.

## 2 Gebruikte databestanden

Om de 3D zoet-zout verdeling en de zoet-zout grensvlakken te creëren wordt gebruik gemaakt van verschillende typen databestanden. In dit hoofdstuk worden deze databestanden gepresenteerd en worden de locaties van de saliniteitsmetingen in de Provincie Fryslân gevisualiseerd.

Deltares heeft overigens al eerder in (delen van) de Provincie Fryslân de 3D zoet-zout verdeling geconstrueerd. Dit was o.a. in het kader van MIPWA (Delsman and Oude Essink, 2008; Oude Essink, 2006), NHI (Oude Essink and Verkaik, 2010) en het Interreg CLIWAT project (noordwest Friesland; Faneca Sánchez et al., 2012). In de onderhavige studie zijn nieuwe saliniteitsmetingen aan de bestaande database toegevoegd.

De data werd gefilterd op basis van datum en locatie/diepte. Als op een bepaalde locatie én diepte meerdere metingen beschikbaar zijn als een functie van de tijd, dan wordt alleen de meest recente gebruikt. De datasets met chloride concentratie metingen zijn direct gebruikt voor de interpolatie. Bij Elektrische Conductiviteit (EC)-metingen is de chloride concentratie berekend op basis van de conversie vergelijking van De Louw et al. (2011). De  $EC_{w,25}$  waarden zijn getransformeerd naar chloride concentraties aan de hand van 79 grondwater monsters uit de Provincie Zeeland (lineaire regressie analyse,  $R^2 = 0.98$ ):

$$Cl^- (g / L) = EC_{w,25} (mS / cm) \cdot 0.36 - 0.45 \quad (1)$$

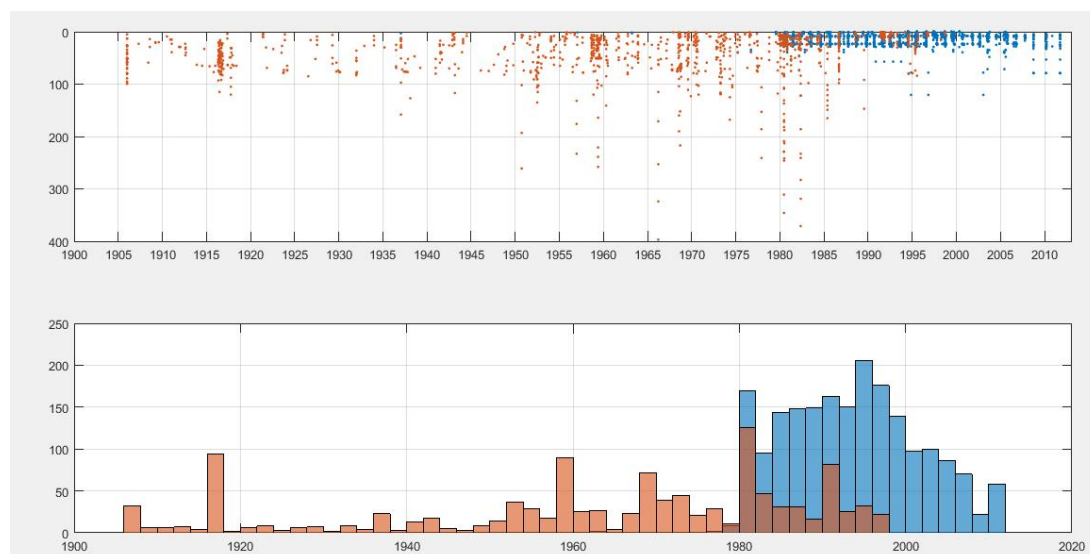
waar:

- $Cl^-$  = de chloride concentratie (g Cl/L),
- $EC_{w,25}$  = Electrical Conductiviteit van water by 25°C (mS/cm).

## 2.1 Chloride analyses

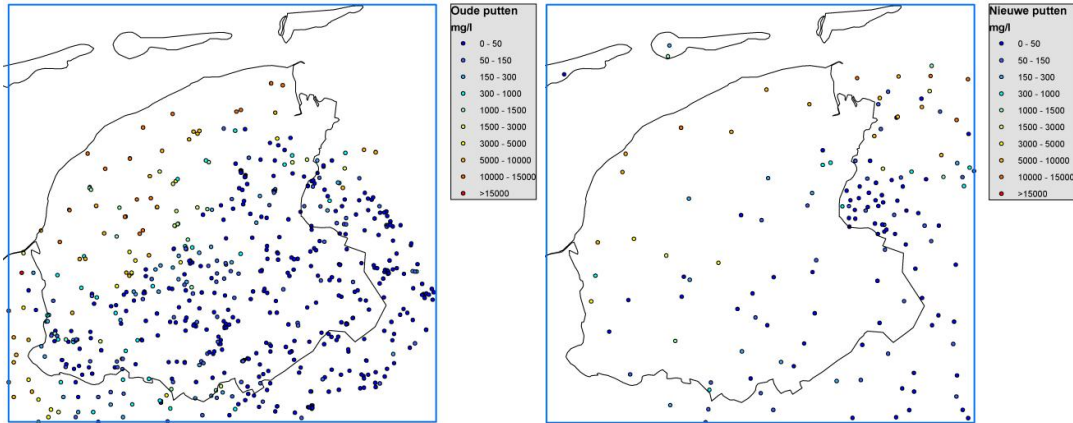
### 2.1.1 Data uit DINOloket

In geheel Nederland zijn vanaf 1853 ruim 60.000 chloride analyses uitgevoerd. Deze analyses zijn opgenomen in de DINOloket database. Het zijn vaak saliniteitsmetingen op dezelfde locaties maar op meerdere momenten in de tijd. In geheel Nederland is gemiddeld 30% van de metingen brak tot zout grondwater. Juist deze metingen zijn waardevol voor de bepaling van de 3D zoet-zout verdeling. Al met al lijkt het databestand omvangrijk, maar praktisch gezien valt de bruikbaarheid tegen voor de bepaling van de 3D zoet-zout verdeling. In Figuur 2.1 is de data van de Provincie Fryslân afgedrukt in een tweetal grafieken. De nieuwe saliniteitsmetingen die zijn toegevoegd in deze studie zijn blauw gekleurd.

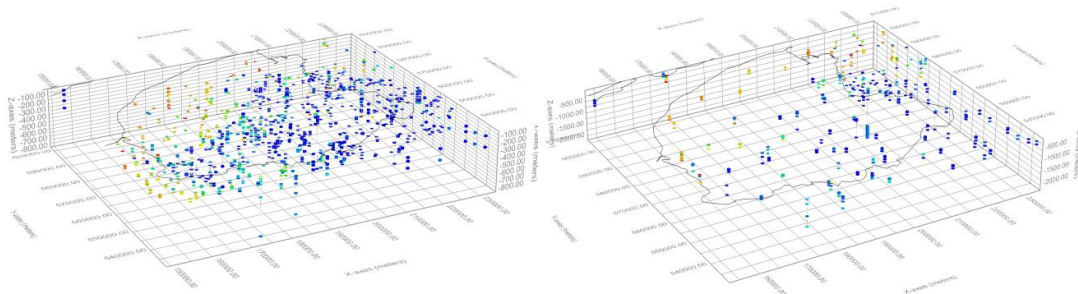


Figuur 2.1: a. Diepteligging van de meting (in m onder maaiveld) als een functie van het jaartal van meting (AD). De metingen die rood zijn gekleurd zijn in 2005 getrokken uit (de voorloper van) de database van DINOloket, de blauwe metingen zijn voor deze opdracht verzameld in 2017; b. het aantal metingen als een functie van het jaartal van meting (AD).

Figuur 2.2 en Figuur 2.3 laten de positie van de metingen uit DINOloket zien.



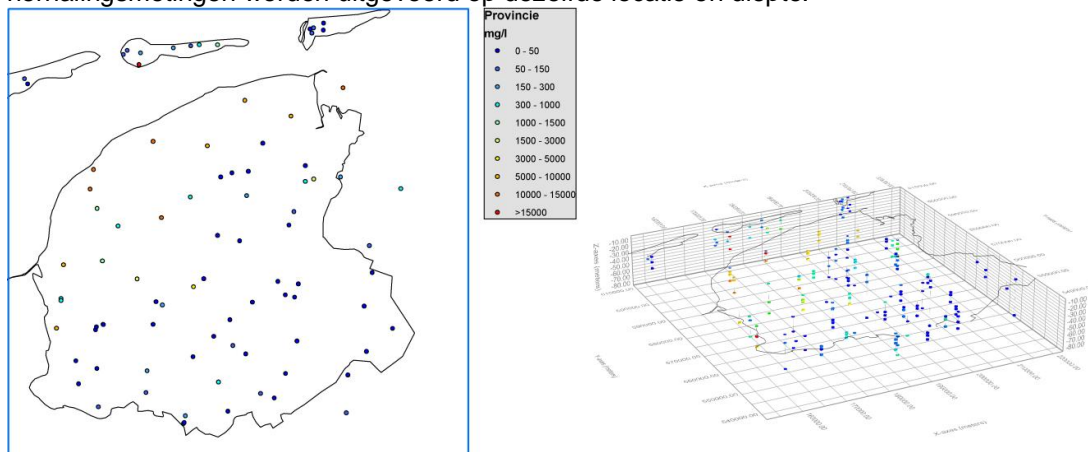
Figuur 2.2: a. Oude metingen op het vaste land onttrokken uit DINOloket en b. Nieuwe metingen voor deze opdracht uit DINOloket onttrokken (de blauwe metingen uit Figuur 2.1). Indien meerdere metingen zich op dezelfde locatie bevinden worden in de figuur de diepste metingen met bijbehorende chloride concentratie getoond.



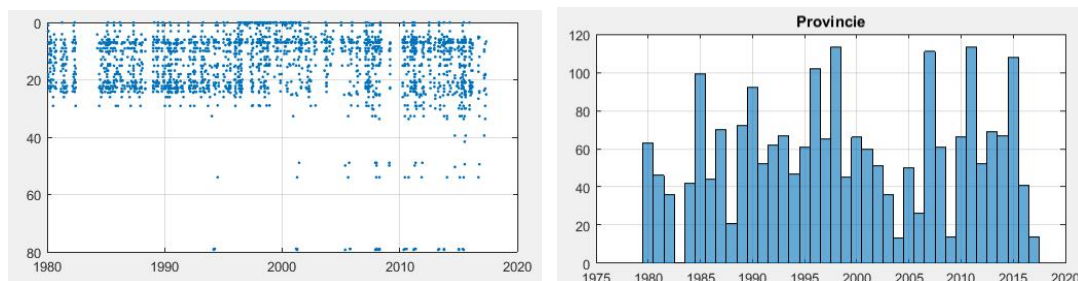
Figuur 2.3: 3D visualisatie binnen iMOD; a. Oude metingen op het vaste land onttrokken uit DINOloket en b. Nieuwe metingen voor deze opdracht uit DINOloket onttrokken.

### 2.1.2 Data van de Provincie Fryslân

Figuur 2.4 toont de ruimtelijke verdeling van de metingen van de Provincie Fryslân. Uit de grote hoeveelheid metingen zoals weergegeven in Figuur 2.5 is te deduceren dat er heel veel herhalingsmetingen worden uitgevoerd op dezelfde locatie en diepte.



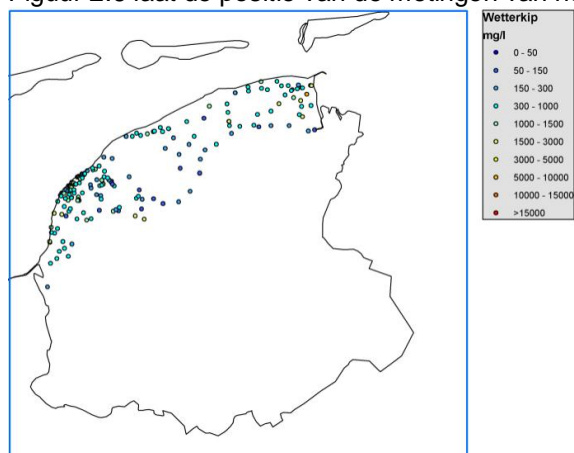
Figuur 2.4: Metingen van de Provincie Fryslân: a. ruimtelijke verdeling; b. 3D visualisatie binnen iMOD.



Figuur 2.5: a. Diepte meting als een functie van het jaartal van meting (AD); b. aantal metingen als een functie van het jaartal van meting (AD).

### 2.1.3 Data van het Wetterskip Fryslân

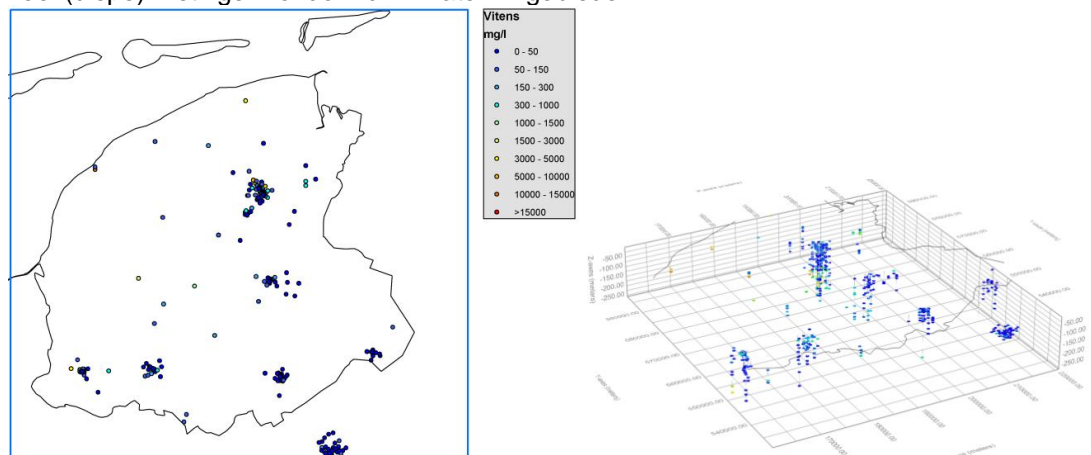
Figuur 2.6 laat de positie van de metingen van het Wetterskip Fryslân zien.



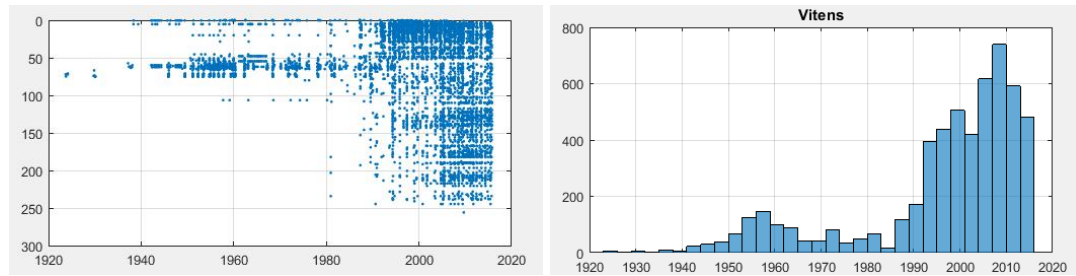
Figuur 2.6: Metingen van de het Wetterskip Fryslân: ruimtelijke verdeling.

### 2.1.4 Data van Vitens

Figuur 2.7 laat de positie van de metingen van het Wetterskip Fryslân zien: vanzelfsprekend veel (diepe) metingen rondom drinkwaterwingegebieden.



Figuur 2.7: Metingen van Vitens: a. ruimtelijke verdeling; b. 3D visualisatie binnen iMOD.

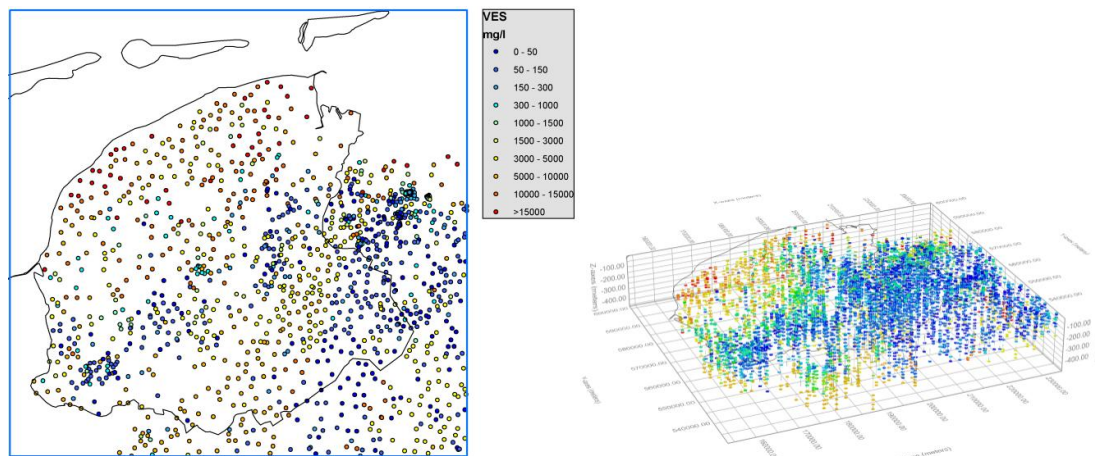


Figuur 2.8: a. Diepte meting als een functie van het jaartal van meting (AD); b. Aantal metingen als een functie van het jaartal van meting (AD).

## 2.2 VES-metingen

Figuur 2.9 laat de posities van de VES metingen zien. Verticale Elektrische Sondering (VES) metingen zijn geo-elektrische metingen die worden uitgevoerd vanaf de oppervlakte. Hierbij wordt de elektroden afstand steeds vergroot voor een steeds diepere indringing van de geo-elektrische meting. Zo geven deze metingen informatie over de bulk elektrische weerstand van de ondergrond in een 1-dimensionaal diepteprofiel. De gemeten elektrische weerstand bij een VES meting is een *schijnbare* elektrische weerstand. Deze moet via een inversiemodel vertaald worden naar een lagenmodel. Het lagenmodel moet zo gekozen worden dat deze de schijnbare weerstand reproduceert. Een probleem bij deze inversieprocedure is *equivalentie* in de inversie; er zijn vaak verschillende lagenmodellen mogelijk om de gemeten schijnbare weerstand te reproduceren. Vanwege de inversie is de resolutie van deze meettechniek niet zo hoog, en neemt bovendien af met de diepte.

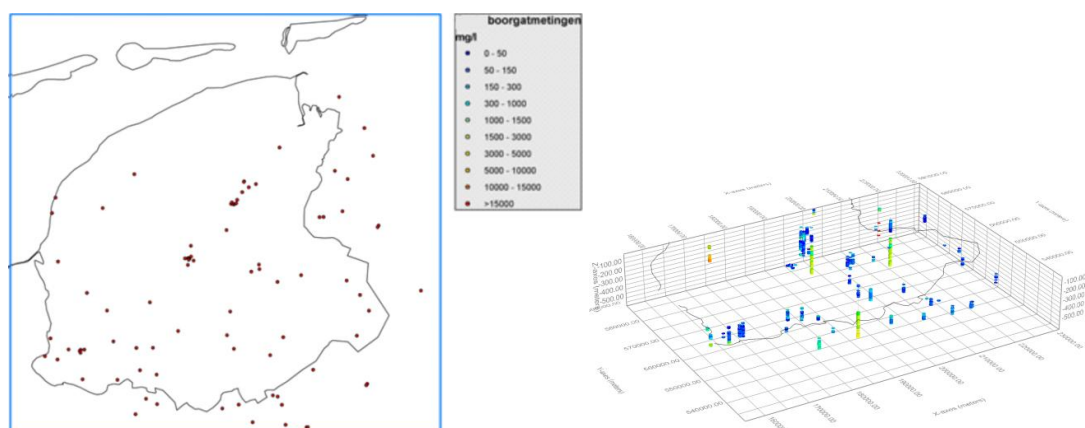
Geïnterpreteerde VES metingen geven informatie over de lithologie (zand, klei, grind) én het zoutgehalte van het grondwater van de ondergrond onder het middelpunt van de meting tot maximaal ~200 m-mv. In combinatie met de temperatuur, het bicarbonaat ( $\text{HCO}_3$ )-gehalte ter plaatse en de geologische opbouw geeft een VES-meting een indicatie van de chlorideconcentratie. VES metingen zijn over het algemeen talrijker dan andere metingen omdat ze in het verleden relatief goedkoop konden worden uitgevoerd.



Figuur 2.9: VES-metingen (uit EC omgezet): a. ruimtelijke verdeling, indien meerdere metingen zich op dezelfde locatie bevinden worden in de figuur de diepste metingen getoond; b. 3D visualisatie binnen iMOD.

## 2.3 Boorgatmetingen

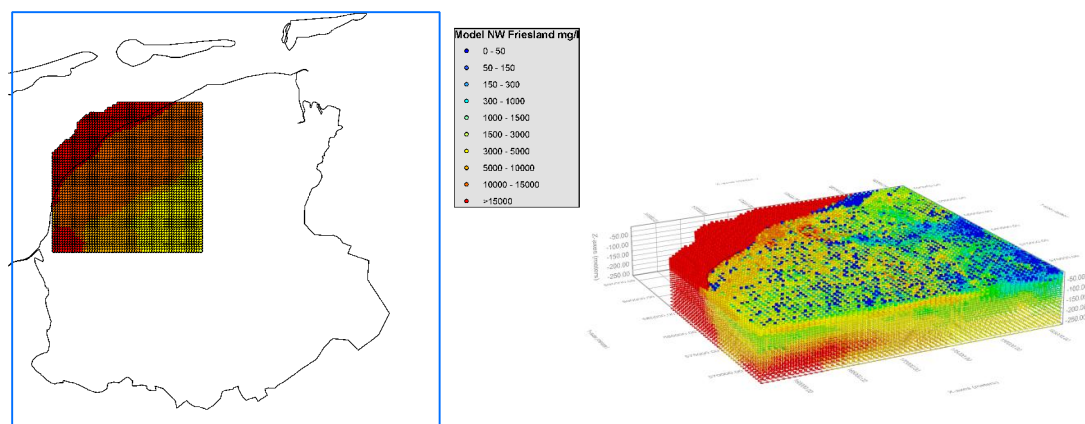
Figuur 2.10 laat de posities van de VES metingen zien. Bij een boorgatmeting laat men een geofysisch apparaat (sonde) in een boorgat zakken en wordt de natuurlijke gamma straling en geo-elektrische weerstand gemeten. Op basis hiervan kan een schatting worden gemaakt van de hydrogeologische opbouw. Tevens kan de chloride concentratie geschat worden. Dit gebeurt op basis van een empirisch bepaalde relatie tussen het bicarbonaat-gehalte ( $\text{HCO}_3$ ) en de elektrische geleidbaarheid ( $\text{EC } 20^\circ\text{C}$ ), inclusief temperatuurcorrectie van de elektrische weerstand van het grondwater (TNO-IGG, 1992).



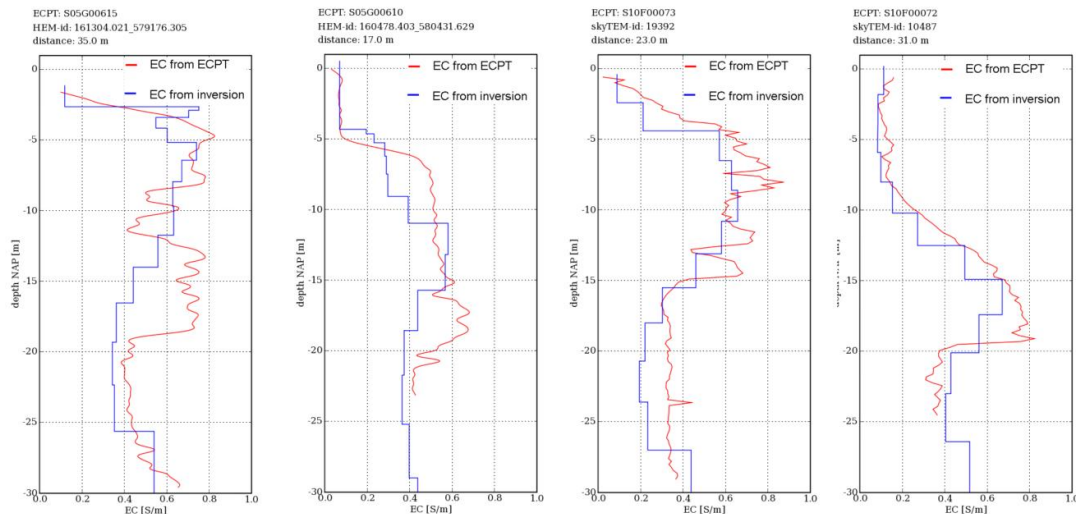
Figuur 2.10: Boorgatmetingen: a. ruimtelijke verdeling; b. een selectie van de boorgatmetingen in 3D visualisatie binnen iMOD.

## 2.4 Airborne EM metingen zoet-zout verdeling

Tijdens het Interreg project Cliwat is in het noordwesten van Friesland de 3D zoet-zout verdeling gekarteerd met behulp van Airborne Electromagnetische Surveys (AEM) van zowel BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Duitsland) als SkyTEM (Aarhus University, Denemarken) (Cliwat, 2011; Faneca Sánchez et al., 2012). Deze intensieve metingen zijn meegenomen in deze studie (Figuur 2.11).



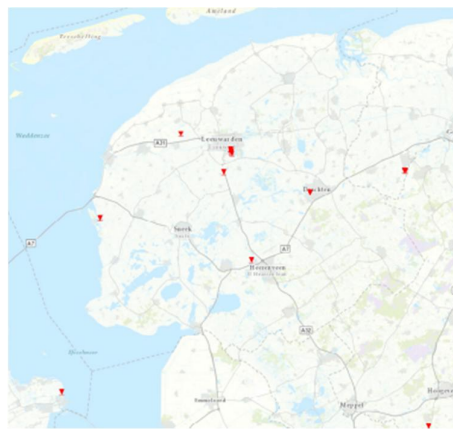
Figuur 2.11: Locaties van de Airborne EM metingen, uitgevoerd tijdens het Cliwat project: a. ruimtelijke verdeling; b. 3D visualisatie binnen iMOD (Cliwat, 2011; Faneca Sánchez et al., 2012).



Figuur 2.12: ECPT versus AEM metingen in de Provincie Fryslân (Clíwat project).

**2.5 ECPTs van Fugro (niet gebruikt in deze analyse)**

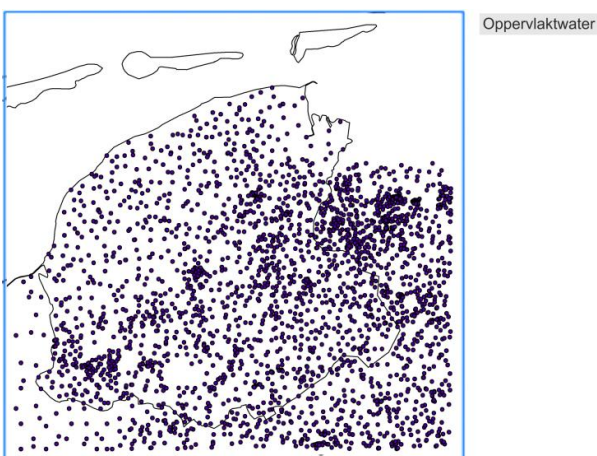
Fugro heeft de afgelopen decennia elektrische geleidbaarheidsonderingen (Electrical Cone Penetration Tests, ECPT) uitgevoerd. Deze sonderingen bevatten tot op grote diepte de gemeten elektrische geleidbaarheid en temperatuur van de grond en het grondwater. Ook worden de conusweerstand, waterspanning en kleeft gemeten (hiermee kan de lithologie worden afgeleid). De beschikbare metingen in de Provincie Fryslân zijn niet in deze analyse meegenomen. Het aantal is klein in relatie tot (meestal minder betrouwbare) saliniteitsmetingen (Figuur 2.13).



Figuur 2.13: Locaties ECPTs van Fugro (rode driehoekjes).

**2.6 Saliniteitsmetingen in het oppervlaktewater**

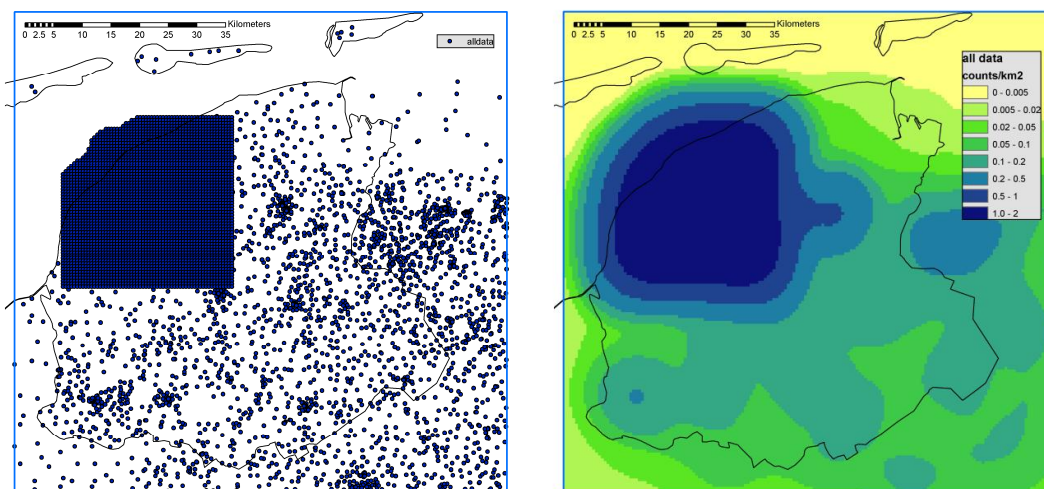
Figuur 2.14 toont de posities van de chloride concentratie metingen in het oppervlaktewater.



Figuur 2.14: Locaties van oppervlaktewater metingen.

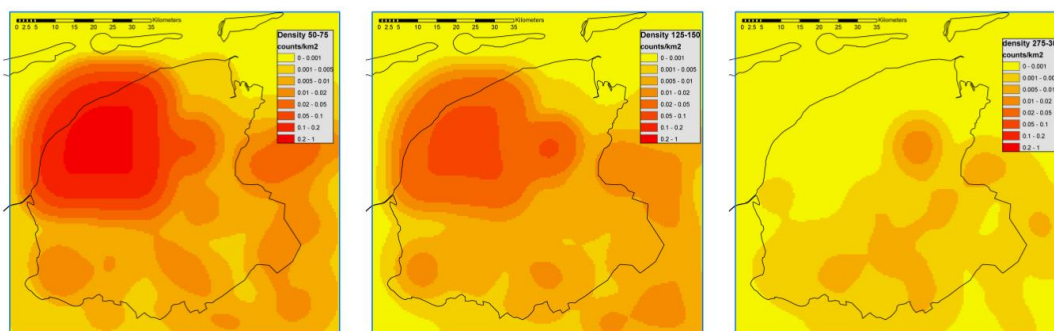
## 2.7 Data dichtheid per geselecteerde dieptes

In deze sectie wordt de data dichtheid op verschillende dieptes bekeken (Figuur 2.15 t/m Figuur 2.17). Deze data dichtheid geeft een indicatie van de betrouwbaarheid van de 3D zoet-zout verdeling ter plaatse; als er in een regio weinig saliniteitsmetingen zijn, dan is de betrouwbaarheid van de 3D zoet-zout verdeling kleiner dan in een regio waar veel saliniteitsmetingen beschikbaar zijn. De AEM dataset domineert het noordwesten van de provincie, terwijl ook rondom de Vitens drinkwaterwingebieden de data dichtheid ook hoog is. Het uiterste noordoosten van de provincie, rondom het Lauwersmeer komt er karig af: de data dichtheid is daar beperkt. Bovendien neemt het aantal metingen vanaf -100m NAP en dieper af (Figuur 2.16); als je daarbij optelt dat veel metingen in deze regio (relatief onbetrouwbare) VES metingen zijn, dan is het waarschijnlijk dat de betrouwbaarheid van de 3D zoet-zout verdeling ter plaatse laag is. In Bijlage A is de data dichtheid voor verschillende diepte intervallen afgedrukt.

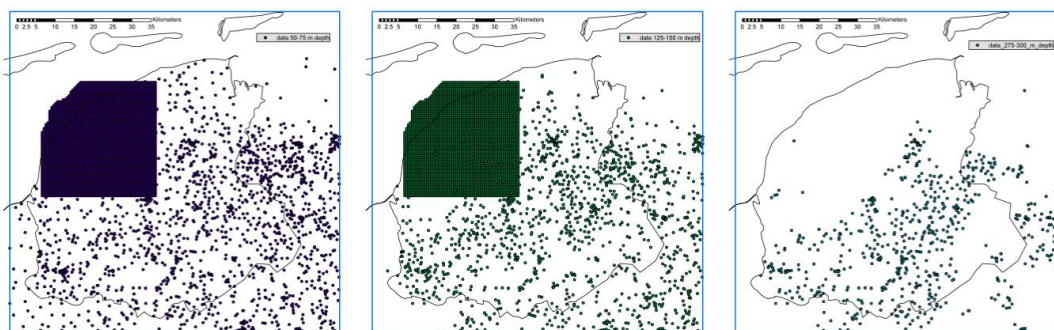


Figuur 2.15: Data dichtheid (kernel density) van alle databases bij elkaar: a. ruimtelijke positie per datapunt; b. geïnterpoleerde data: eenheid aantal punten per km<sup>2</sup> (alle punten worden opgeteld binnen een straal van 5km, gedeeld door het cirkel oppervlakte met 5km straal).





Figuur 2.16: Geïnterpoleerde data dichtheid (kernel density) over drie intervallen: eenheid aantal punten per  $\text{km}^2$  (alle punten worden opgeteld binnen een straal van 5km, gedeeld door het cirkel oppervlakte met 5km straal).



Figuur 2.17: Dichtheid (kernel density) over drie intervallen: ruimtelijke posities van de data.

### 3 Gebruikte methode van interpolatie

De saliniteits metingen (in zogenaamde IPF format, zie Vermeulen et al. (2017)) kunnen worden ingelezen en in 3D gevisualiseerd door iMOD. Met de iMOD xyz2idf functie is het mogelijk om de data van verschillende locaties en dieptes te interpoleren (en extrapoleren) om een continu 3D model van de zoet-zout verdeling te creëren (Vermeulen et al., 2017).

De belangrijkste parameters van de interpolaties zijn:

1. de diepte intervallen: de interpolatie wordt uitgevoerd uitsluitend binnen constante diepte intervallen. In deze opdracht werden twee intervalwaarden gekozen: 10m en 25m. De kleine intervalwaarde van 10m heeft het voordeel van meer verticale resolutie (gunstig op kleinere diepte waar relatief veel data beschikbaar is), terwijl de grote intervalwaarde van 25m het voordeel heeft dat meer data wordt meegenomen in de interpolatie, hetgeen op grotere diepte waar minder data beschikbaar gunstig is,
2. de horizontale resolutie: er zijn cellen van  $100 \times 100\text{m}^2$  gebruikt,
3. de interpolatie methode: preconditioned conjugate gradient, met belangrijkste parameters  $\text{HCLOSE}=0.001$ ,  $\text{SILL}=30000.00$ ,  $\text{NUGGET}=1.0$  en  $\text{RANGE}=30000.0$ . Voor uitleg, zie Vermeulen et al. (2017)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> <https://www.deltares.nl/nl/software/imod-2/>

De chloride concentratie database is input voor de interpolatie. We hebben in deze opdracht alle databases tegelijk gebruikt. Verschillende databases hebben verschillende betrouwbaarheden. Zo zijn directe metingen (chloride, EC, boorgatmetingen) het meest betrouwbaar, terwijl VES metingen minder betrouwbaar zijn. De (indirecte) AEM metingen zoals gebruikt in deze analyse zijn in principe minder nauwkeurig dan de directe metingen, maar onder de juiste omstandigheden kunnen ze toch heel betrouwbaar zijn; zie Figuur 2.12 voor de vergelijking tussen ECPTs en AEM metingen in het noordwesten van de Provincie Fryslân (Ciwat project). Het zijn bovendien ook heel veel metingen. In het project FRESHM Zeeland: FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland is aangetoond dat deze AEM metingen een zeer betrouwbare zoet-zout verdeling kunnen opleveren (Van Baaren et al., 2016, 2017; Siemon et al., 2017).

De output van de interpolatie zijn IDF files. Deze kunnen direct worden gevisualiseerd in iMOD. Met een Python script zijn de IDF files omgezet naar ASCII files die leesbaar zijn binnen ArcGIS. Tevens is een 'tooltje' gemaakt om de data om te zetten naar een format van het visualisatie pakket TECPLOT en om aan de hand van de ASCII files grensvlakken te maken.

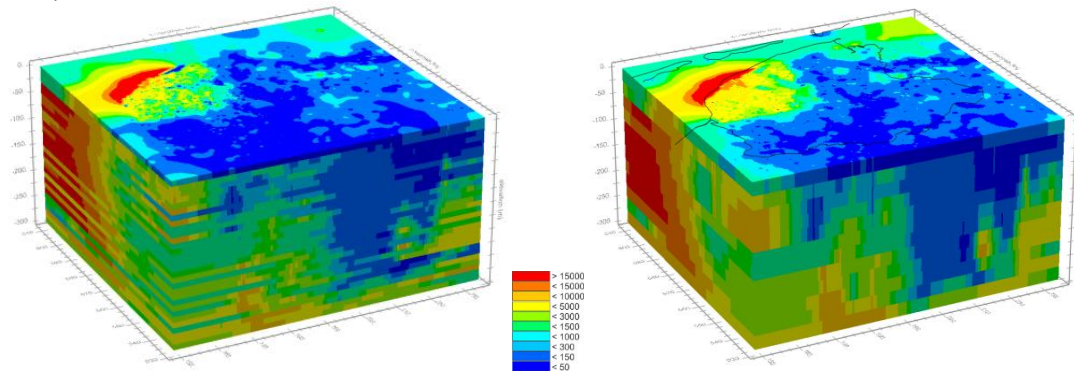
## 4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de interpolaties getoond: de 3D zoet-zout verdeling in het grondwater en de zoet-zout grensvlakkaarten.

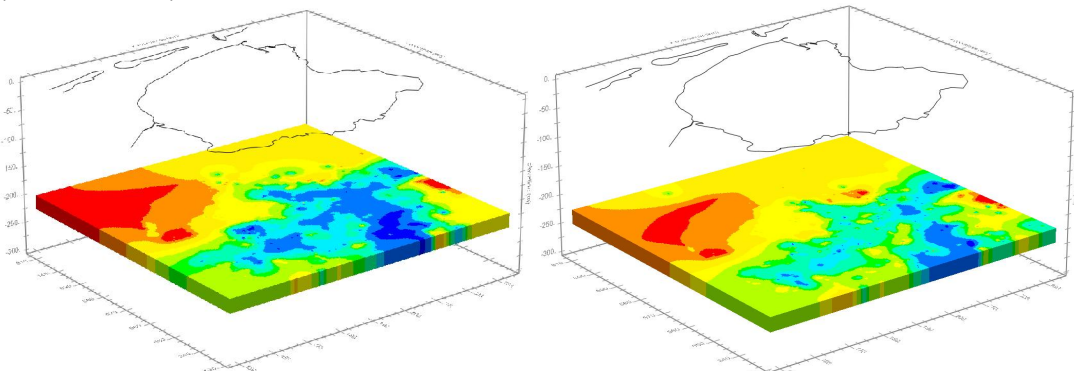
### 4.1 Zoet-zout verdeling in het grondwater van de Provincie Fryslân

#### 4.1.1 iMOD visualisaties

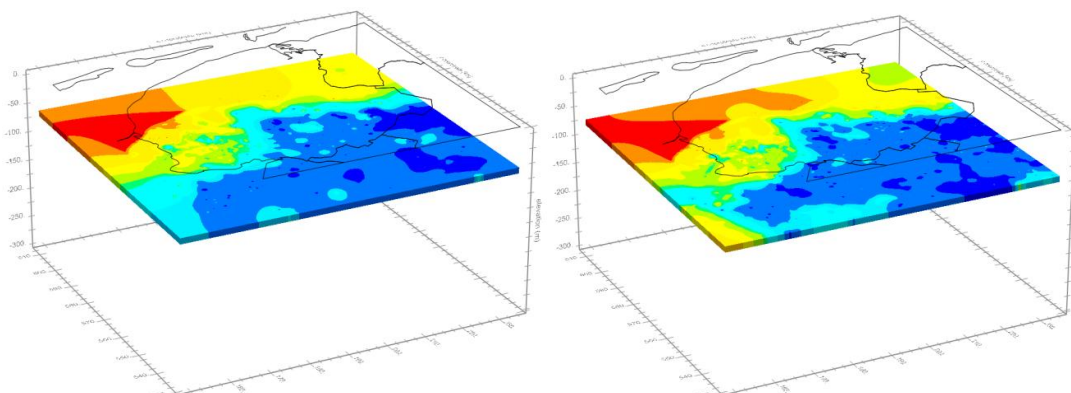
Figuur 4.1 toont de 3D zoet-zout verdelingen van de twee modellen: 30 modellagen van 10m (links) en 12 modellagen van 25m (rechts). De verdeling van het grove model met 25m dikke modellagen vertoont met de diepte een rustiger, homogener patroon. Het model met 10m dikke modellagen lijkt af en toe ad-hoc zoet-zout modellagen te tonen (Figuur 4.3); als in een 10m dikke modellaag toevallig weinig saliniteitsmetingen aanwezig zijn, dan kunnen chloride concentratie metingen die op afstand liggen de zoet-zout verdeling bepalen (zie bijv. in Figuur 4.3 het verschil in het zuidwesten tussen de modellagen -60m - -70m NAP en -70m - -80m NAP).



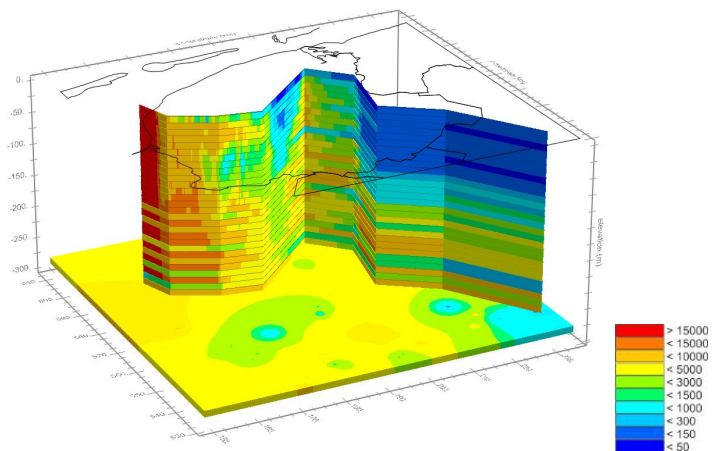
Figuur 4.1: 3D chloride concentratie verdeling: a. 30 modellagen van 10m dikte en b. 12 modellagen van 25m dikte (iMOD visualisatie).



Figuur 4.2: Twee modellen van het 25m dikke model: a. tussen -200m - -225m NAP en b. -225m - -250m NAP (iMOD visualisatie).



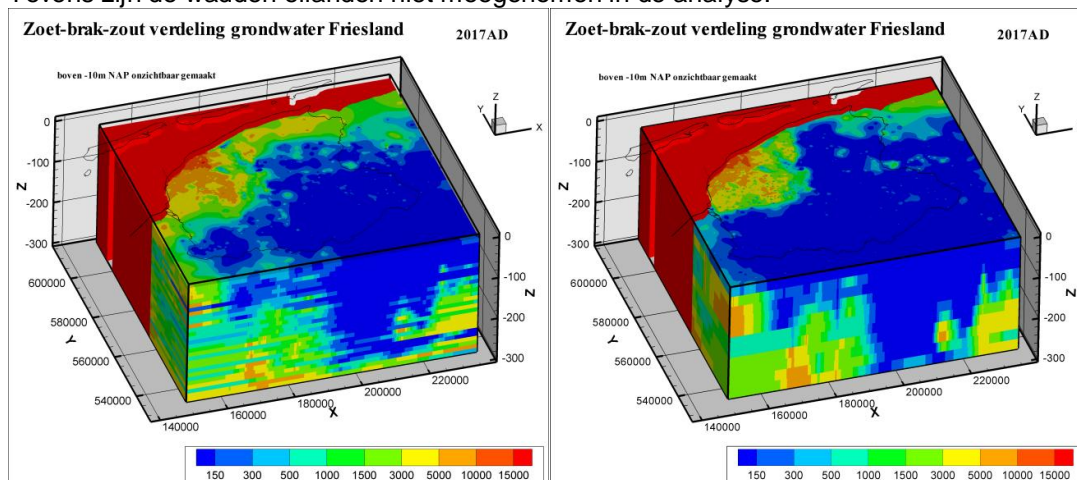
Figuur 4.3: Twee modellagen van het 10m dikte model: a. tussen -60m - -70m NAP en b. -70m - -80m NAP (iMOD visualisatie). Het verschil in concentratie in het zuidwesten wordt veroorzaakt door het al dan niet meenemen van metingen met chloride concentraties van zout-brak grondwater.



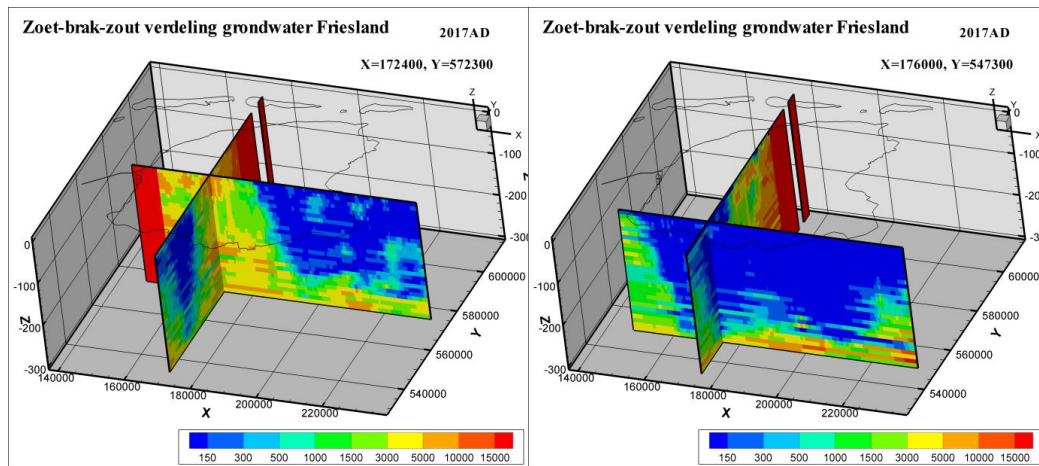
Figuur 4.4: 2D FENCE optie van de visualisatietool iMOD.

## 4.1.2 TECPLOT visualisaties

In de TECPLOT visualisatie is de concentratie offshore gelijk gesteld aan 16000 mg Cl/L. Tevens zijn de wadden eilanden niet meegenomen in de analyse.



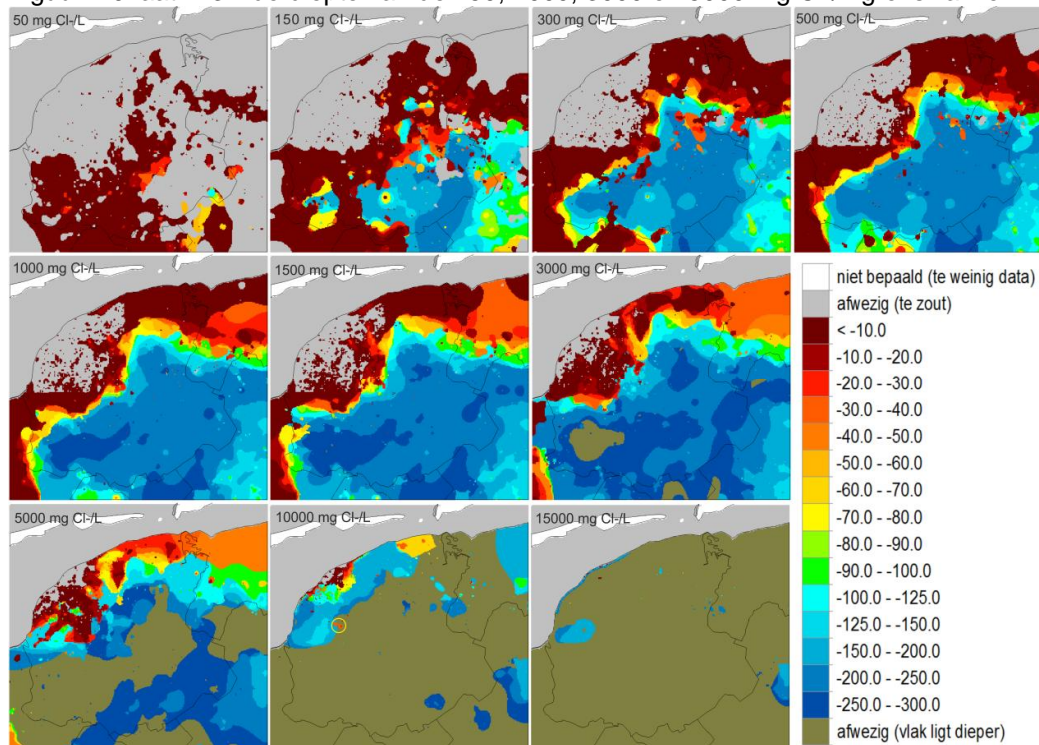
Figuur 4.5: 3D zoet-zout verdeling (in chloride concentraties): a. 30 modellagen van 10m dikte en b. 12 modellagen van 25m dikte (TECPLOT visualisatie).



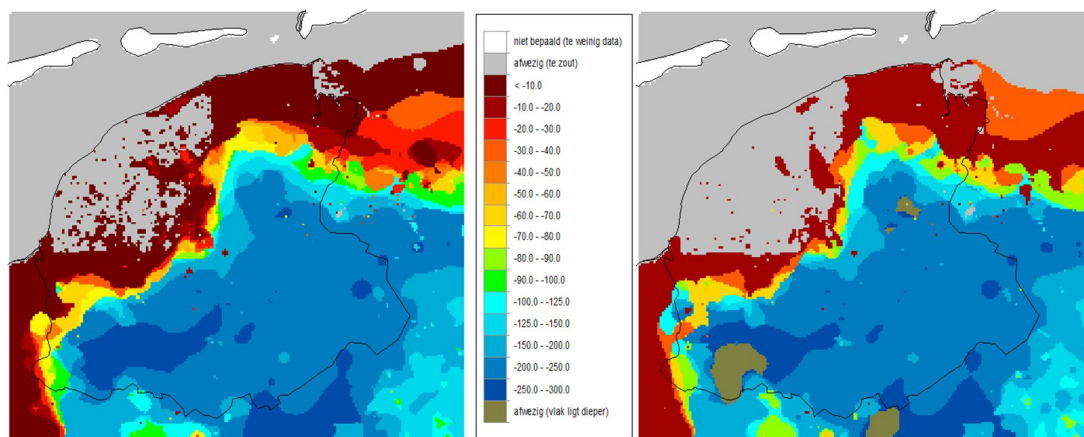
Figuur 4.6: 2D profielen met de chloride concentratie van het grondwater, voor het model met 30 modellagen van 10m dikte. a. X=172400m en Y=572300m; b. X=176000m en Y=547300m.

#### 4.2 Zoet-zout grensvlakkaarten

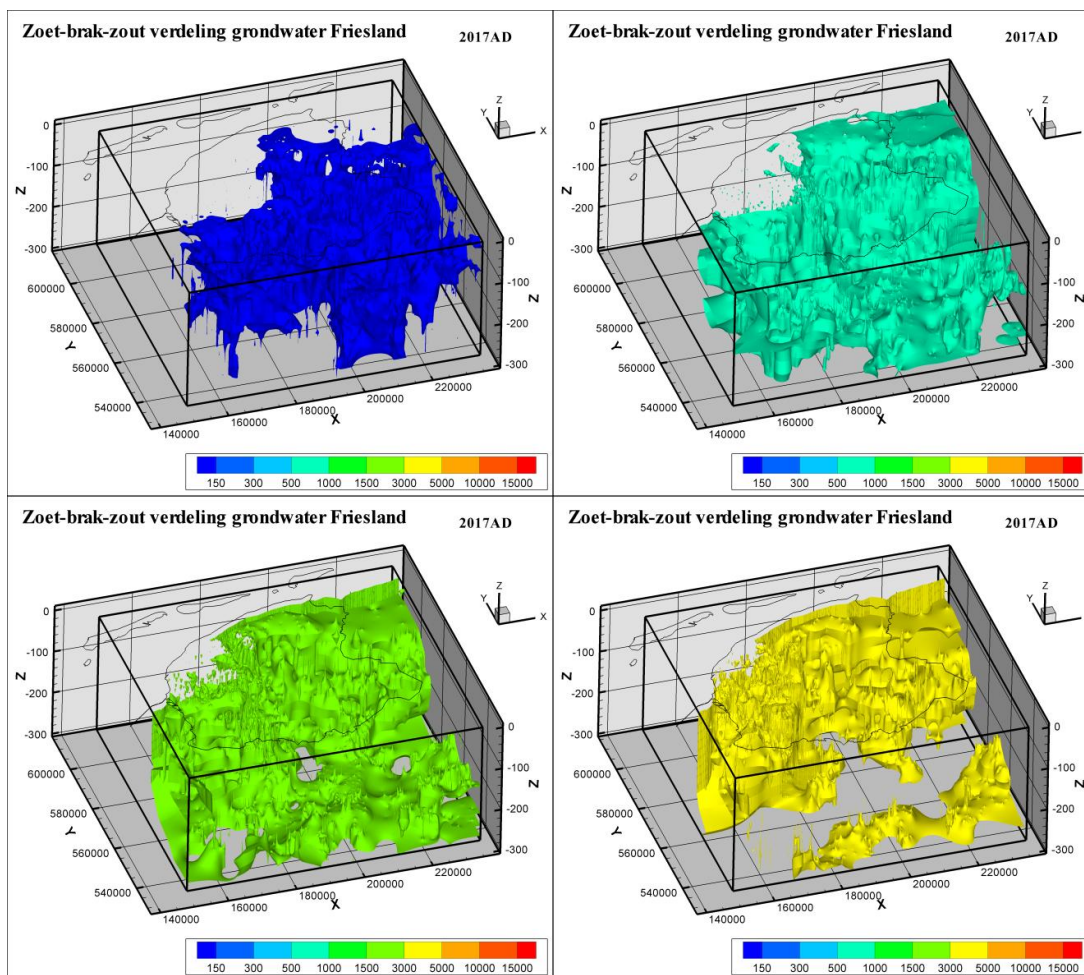
De 3D zoet-zout verdeling uit de voorgaande sectie is gebruikt om tien zoet-zout grensvlakkaarten te maken. In de berekening hiervan wordt het grensvlak van bovenaf bepaald. Zout-zout inversies, waar meerdere grensvlakken van toepassing zijn worden niet vastgelegd. Figuur 4.7 toont de grensvlakken van het model met 30 modellagen van 10m dikte. De grijze gebieden zijn gebieden waar het grensvlak afwezig is omdat het systeem al bovenin zouter is; de bruine gebieden zijn gebieden waar het desbetreffende grensvlak dieper ligt dan de onderkant van het totale grondwatersysteem (viz. -300m NAP). Het verschil tussen de twee modellen met 10m en 25m modellagen is te zien in Figuur 4.8. Op een regionale schaal lijken de verschillen niet aanzienlijk, lokaal kan het echter veel uitmaken. Figuur 4.9 laat in 3D de diepte van de 150, 1000, 3000, 5000 en 10000 mg Cl/L grensvlakken zien.



Figuur 4.7: Diepte van 10 grensvlakken met verschillende chloride concentraties, 30 modellagen van 10m dikte.



Figuur 4.8: Diepte grensvlak 1000 mg Cl/L: links 30 modellagen van 10m dikte en rechts 12 modellagen van 25m dikte (iMOD visualisatie).

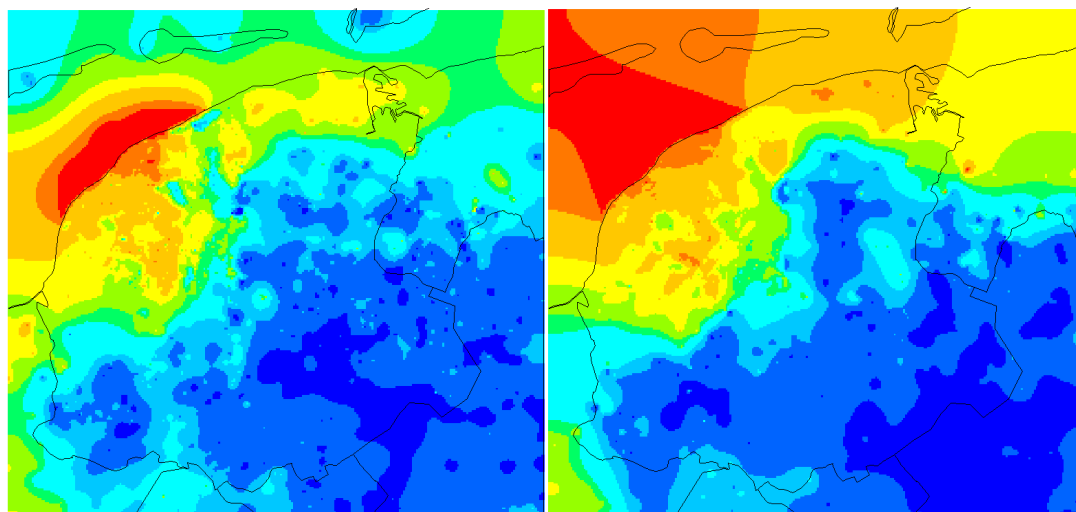


Figuur 4.9: Diepte grensvlakken 150, 1000, 3000 en 5000 mg Cl/L, in de vorm van vlakken van gelijke chloride concentraties (isochlor-vlakken) in 3D, van het grove model (12 modellagen van 25m dikte) (TECPLOT visualisatie).

### 4.3 Discussie

In de vorige secties is te zien dat de grensvlakken af en toe abrupt verspringen; dit zijn zogenaamde 'spikes' in het grensvlak. Spikes kunnen in het grensvlak ontstaan als een desbetreffende saliniteitsmeting met een hogere chloride concentratie zeer lokaal en veel ondieper in het grondwatersysteem voorkomt (Figuur 4.10). Zo is in de Figuur 4.6a (nabij X=172400 en Y=572300m) en Figuur 4.7i (gele cirkel) te zien dat het 10000 mg Cl<sup>-</sup>/L-grensvlak op één locatie omhoog schiet naar 15 m-NAP, terwijl in alle omliggende punten het grensvlak op -300 m NAP ligt, of zelfs dieper. Ook grensvlakken met een andere chloride concentratie vertonen dergelijke 'spikes' in het grensvlak (Figuur 4.7 en Figuur 4.9).

Hoge chloride concentraties komen vaak uit de VES database (Figuur 2.9). Metingen van Vitens (bijv. 05HP0073.3 of 06DP0210.5, Figuur 2.7) zijn soms ook erg hoog. Het is overigens bekend dat de nauwkeurigheid van VES data soms te wensen over laat.



Figuur 4.10: Twee modellagen van het 10m dikte model: a. tussen -10m - -20m NAP en b. -40m - -50m NAP (iMOD visualisatie). De zoet-zout verdeling toont af en toe lokaal hogere concentraties, resulterend in de zogenaamde 'spikes'. In figuur a. worden de hoge concentraties en dus de 'spikes' buiten het gebied van de Cliwat database veroorzaakt door de relatief hoge waarden van de VES database; in figuur b. worden de hoge concentraties in het Cliwat gebied veroorzaakt door de Cliwat database.

Een ander voorbeeld aan en 'spike' is bij Spannenburg (X=176000m en Y=547300m, Figuur 4.6), waar het 300 mg Cl<sup>-</sup>/L-grensvlak een flinke verhoging laat zien ten westen van de winning. Metingen van Vitens en de VES metingen laten waarden van boven de 300 mg Cl<sup>-</sup>/L zien. De hier gecreëerde zoet-zout verdeling is consistent met de metingen en met het beeld dat in de omgeving van Spannenburg 'pockets' van brak grondwater zitten met daaronder in het watervoerend pakket weer lagere chloride concentraties.

De aanwezigheid van de bovengenoemde 'spikes' in het grensvlak is hoe dan ook niet altijd gemakkelijk te verklaren. Het verschijnsel is regelmatig gelieerd aan het tekort aan voldoende (betrouwbare) metingen in de regio. Meer metingen zouden namelijk leiden tot een consistentere ruimtelijke verdeling van (hoge) chloride concentraties, zodat de zogenaamde 'spike' in het grensvlak een vlak wordt.

Tegelijk is de zoet-zout verdeling in werkelijkheid vaak grillig; dit is in meerdere grondwatersystemen expliciet waargenomen. Afwijkende chloride concentraties in een verder homogene zoet-zout verdeling is meestal gelieerd aan de geologische en paleo-hydrogeografische omstandigheden. De geologische omstandigheden kunnen zodanig zijn

dat brak of zout grondwater is ingesloten in een verder zoet grondwatersysteem. In het verleden kan tijdens een transgressie zout zeewater zijn geïnfiltreerd en is het systeem nog steeds niet volledig doorgespoeld met zoet (regen)water.

Grillige zoet-zout verdelingen (inclusief zout-zoet inversies) komen veelvuldig voor in grondwatersystemen in deltagebieden zoals de Bangladesh delta (Faneca Sánchez et al., 2015) en de Mekong delta (Pham et al., 2016). Nederland is daarin niet anders, zie bijvoorbeeld de Provincies Zeeland (Van Baaren et al., 2017; Goes and Vernes, 2010) en Zuid-Holland (Oude Essink, 2017). Zo lijken de oorzaken van het bestaan van zout-zoet inversies te liggen in het verleden. Transgressies van zout zeewater die over -in lange tijd omgebouwde- zoetwatervoorraden schuiven en het systeem versneld doen verzilten. In wetenschappelijk werk van o.a. Kooi et al. (2000), Kooi en Groen (2001), en Post (2004) is hiervoor de theoretische onderbouwing neergelegd, en in Delsman et al. (2014) en Lebbe et al. (2012) is dit verziltingsproces -leidend tot zout-zoet inversies in het grondwatersysteem- met numerieke modellen uitgebreid aangetoond. Het is evident dat in de 3D werkelijkheid een complexe heterogeniteit van de ondergrond in combinatie met transgressies van zoutwater intrusie, mogelijk via preferente stroompaden, zal leiden tot veelvoorkomende zout-zoet inversies. Hieronder een drietal Nederlandse voorbeelden, ter illustratie van het belang van de geologie op het voorkomen van zoet-zout inversies.

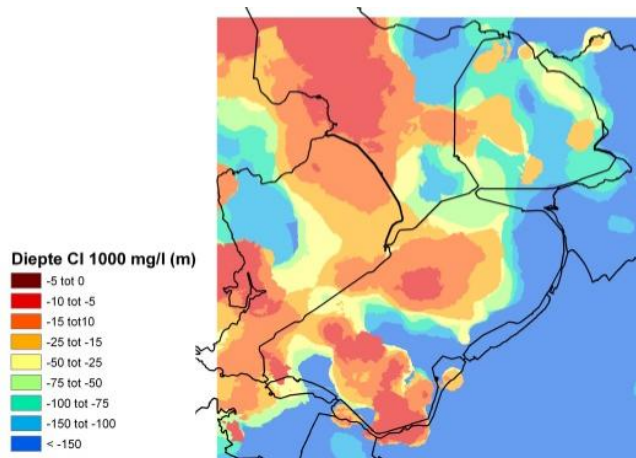
#### **Case Flevoland** (Oude Essink et al., 2008)<sup>2</sup>

De transgressies gedurende het Holoceen (laatste 10.000 jaar), en niet de transgressies van het Pleistoceen, hebben ervoor gezorgd dat de Provincie Flevoland momenteel veel brak en zout grondwater bevat. Brak tot zout grondwater in de bovenste 200 meter van de Provincie Flevoland is zeer waarschijnlijk volledig toe te schrijven aan de transgressies van het vroeg-Holoceen (~5000 jaar geleden), toen er nog nauwelijks een weerstands biedende slecht doorlatende deklaag was ontwikkeld. Aan de hand van dwarsprofielen in de Flevopolders is een duidelijke relatie aangetoond tussen de chloride concentratie verdeling in de ondergrond en de aanwezigheid van scheidende kleilagen. Infiltratie van brak tot zout water kon eenvoudig plaatsvinden; dit proces werd nog eens versneld door dichtheidseffecten, vooral in de getijdengeulen. Het zoute water dat infiltreerde varieerde per locatie en met de tijd door verdunning als gevolg van de aanwezigheid van de monding van verschillende beken en/of rivieren. Omdat de hoger gelegen delen bedekt waren met hoogveen was daar verzilting van het grondwatersysteem afwezig en kon zich zodoende een grote voorraad zoet grondwater ontwikkelen, met name bij de randmeren en Zuidelijk Flevoland (derde watervoerend pakket, onder de kleilagen van het glaciaal bekken).

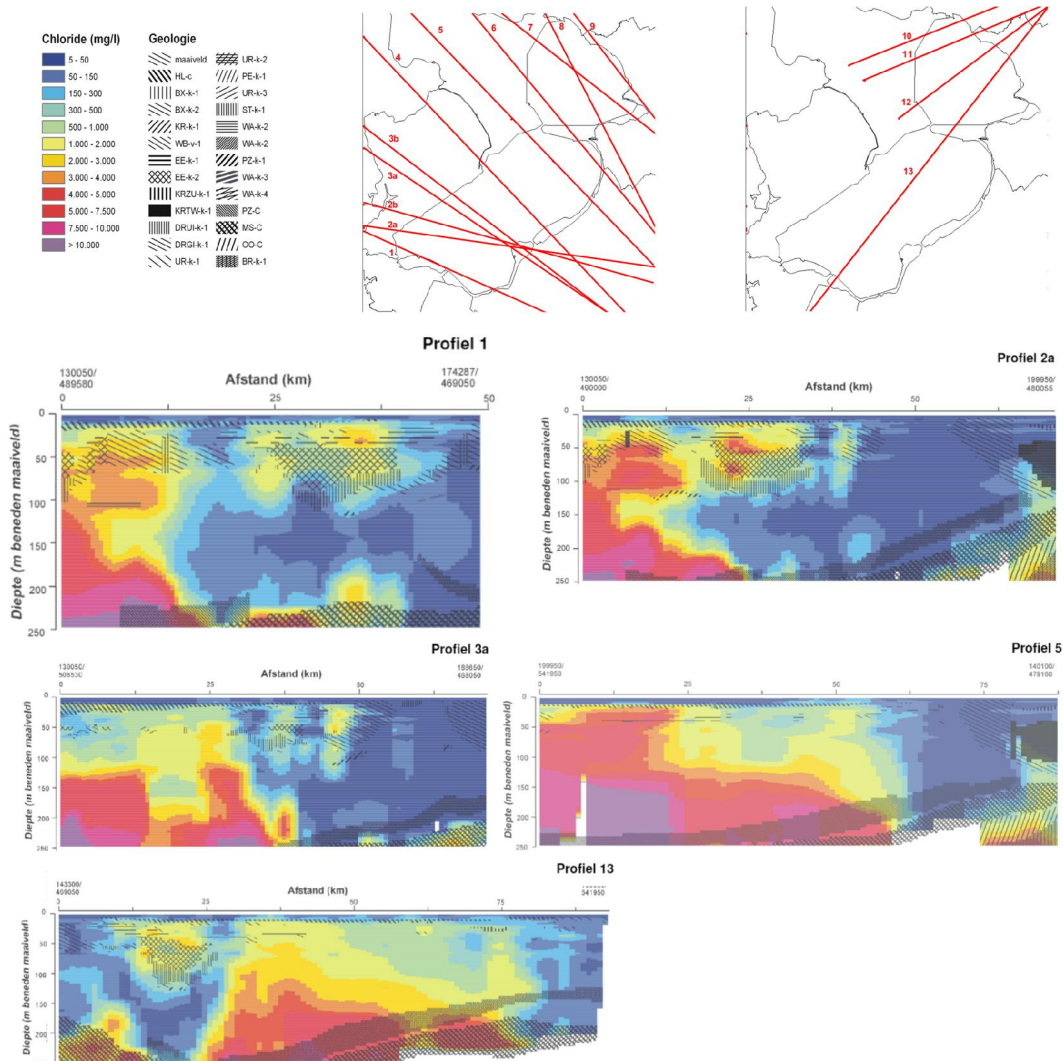
---

<sup>2</sup> [Link](http://zoetzout.deltares.nl) op zoetzout.deltares.nl





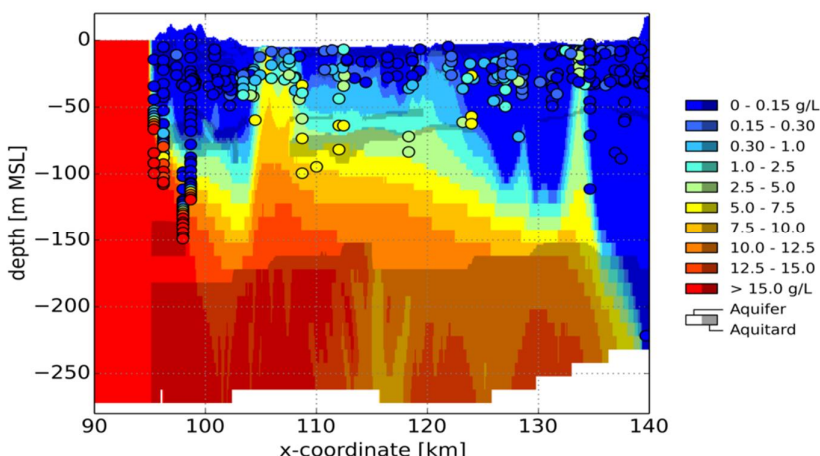
Figuur 4.11: Diepte zoet-zout grensvlak van 1000mg Cl/L te Flevoland.



Figuur 4.12: 2D profielen Flevoland: Soms doet de geologie ertoe, en soms weer niet. Grensvlakken met verschillende chloride concentratie waarden (300, 1000, 5000 mg Cl/L) duiken over korte afstand abrupt diep weg.

### Case Waternet - Groot-Mijdrecht (Delsman, 2015; Delsman et al., 2014b)

Door de lange reistijden van water in de ondergrond wordt de zoet-zout verdeling in het grondwater in de Nederlandse kustregio nog in belangrijke mate bepaald door de Holocene ontwikkeling van dit gebied. Een beter begrip van de invloed van de landschapsontwikkeling gedurende de afgelopen millennia op de ontwikkeling van de zoet-zout verdeling is daarom belangrijk voor het beter begrijpen van de huidige zoet-zout verdeling (Figuur 4.13). Deze studie toont resultaten van simulaties van de Holocene ontwikkeling van de zoet-zout verdeling in het grondwater met behulp van een paleo-hydrogeologisch model. Een 2D paleo-hydrogeografische reconstructie van de zoet-zout verdeling is uitgevoerd, inclusief de bronnen van verzilting en een schatting van de ouderdom van de grondwatersituatie. Het model bereikte op geen moment in de 8500-jarige rekenperiode een evenwichtssituatie, en onderstreept daarmee het lange geheugen van kustnabije grondwatersystemen. Uit de resultaten bleek verder een grotere rol voor pre-Holoceen zout in de huidige zoet-zoutverdeling dan eerder was gedacht.

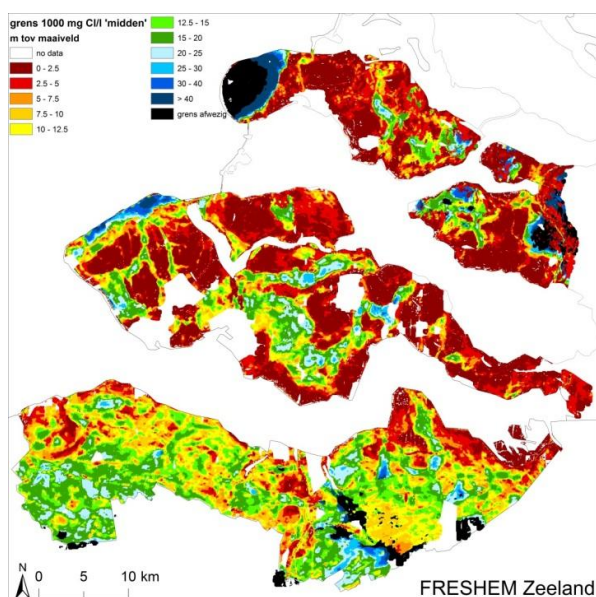


Figuur 4.13: 2D profiel over Waternet en Groot-Mijdrecht: soms zijn de brakke mengzones breed, soms is de zoet-zout overgang scherp, zoals de zeekant van de zoetwaterlens en onder Groot-Mijdrecht. Wat tevens opvalt is het gat in de kleilaag op ongeveer -60-85m NAP landinwaarts achter de duinen: hier is ter plaatse diep brak tot zout grondwater omhoog gestroomd.

### Case FRESHEM Zeeland (Van Baaren et al., 2016, 2017).

In het project FRESHEM Zeeland (FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland zijn drie producten opgeleverd:

- 1 de 3D zoet-brak-zout verdeling met een horizontale resolutie van 50\*50 m2 en een verticale resolutie van 0.5 m. Elk 'blokje Zeeland' van 50\*50\*0.5m3 heeft drie chlorideconcentraties: 'laag', 'midden' en 'hoog'. Deze waarden geven de onzekerheid van de chlorideconcentratie weer.
- 2 de 2D zoet-brak-zout verdeling van het grondwater op de vlieglijnen (profielen) met een horizontale resolutie van ongeveer 4 meter.
- 3 kaarten met de diepte van een vast grensvlak (150, 300, 1000, 1500, 3000 en 10000 mg Cl<sup>-</sup>/l) ten opzichte van maaiveld en NAP. Per grensvlak zijn 3 kaarten beschikbaar: 'laag', 'midden' (Figuur 4.14) en 'hoog'. Deze waarden geven de onzekerheid van de diepte van het grensvlak weer.



Figuur 4.14: Zoet-zout grensvlak 1000mg Cl/L uit de FRESHEM Zeeland kartering: regelmatig ligt een relatief diep grensvlak (blauw) op korte afstand van een relatief ondiep grensvlak (rood). Het (actieve) grondwatersysteem in Zeeland is ondieper dan in Friesland.

## 5 Betrouwbaarheid van de kaarten

De betrouwbaarheid van de kaarten hangt af van de zwakste schakel, en dat is (behalve in het Cliwat gebied) de beperkte hoeveelheid data die is gebruikt bij het construeren van de 3D zoet-zout verdeling. Het is daarom verstandig een zekere mate van terughoudendheid te betrachten bij het inter- en extrapoleren van de gemeten chlorideconcentraties in de ondergrond. De zoet-zout verdeling in het grondwater kan daarbij een grilliger patroon hebben dan we gewend zijn 'rustige homogene' stijghoogtevelden. De huidige zoet-zout verdeling is namelijk een resultante is van complexe grondwaterstromingsprocessen over de laatste honderden tot duizenden jaren. Dit is omdat zout transport (erg) traag verloopt (de natuurlijke verplaatsing van zout door de ondergrond is in de orde van meters per jaar). De zoet-zout verdeling heeft dus een 'geschiedenis', waarbij het grondwaterstromingspatroon over een (zeer) lange tijdsperiode van groot belang is. Delsman et al. (2014) laat dit in hun artikel treffend zien. De geologie draagt tevens bij aan de grilligheid. Dit alles heeft tot gevolg dat de zoet-zout verdeling op korte afstand flink kan variëren. De Louw et al. (2011) (figuur 9) beschrijft zo'n grondwatersysteem rondom een zoetwaterlens in Zeeland, waar over een korte afstand van 100 m het zoet-zout grensvlak 10 m wegschiet naar de diepte omdat kleine infiltratiesnelheden het zoet-zout grensvlak op de ene plek over vele decennia heeft verlaagd en kleine kwelsnelheden dit grensvlak op de nabijgelegen andere plek heeft verhoogd tot aan bijna het maaiveld.

Met de huidige stand qua kennis en tools bestaat ons advies om de 3D zoet-zout verdeling verder te verbeteren uit het volgende onderdelen:

1. Paleo-hydrogeografische reconstructie van de huidige 3D zoet-zout verdeling in de Provincie Fryslân, met behulp van modellen die dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport simuleren. Dit onderdeel heeft reeds in de Provincie Fryslân in 2017 plaatsgevonden, binnen de Brede Grondwaterstudie Fryslân. Bijkomend voordeel van dit modelinstrumentarium is dat als het verleden goed

- kan worden nagebootst dat dan ook beter de toekomst kan worden voorspeld. Te denken valt aan de effecten van toekomstige spanningen zoals de effecten van zeespiegelstijging, waterhuishoudkundige maatregelen, WKO installaties, etc.,
2. Uitvoeren van nieuwe saliniteitsmetingen, juist in gebieden waar de data dichtheid klein is (Figuur 2.15),
  3. Ontwikkelen van een reproduceerbare workflow om nieuwe informatie over saliniteitsmetingen met inter- en extrapolatietechnieken snel en effectief om te zetten naar een nieuwe versie van de 3D zoet -zout verdeling in het grondwater van de Provincie Fryslân,
  4. Uitvoeren van een Airborne EM survey in die gebieden waar dat mogelijk is (zijnde geen stedelijk gebied en geen glastuinbouwgebied).

## **Disclaimer**

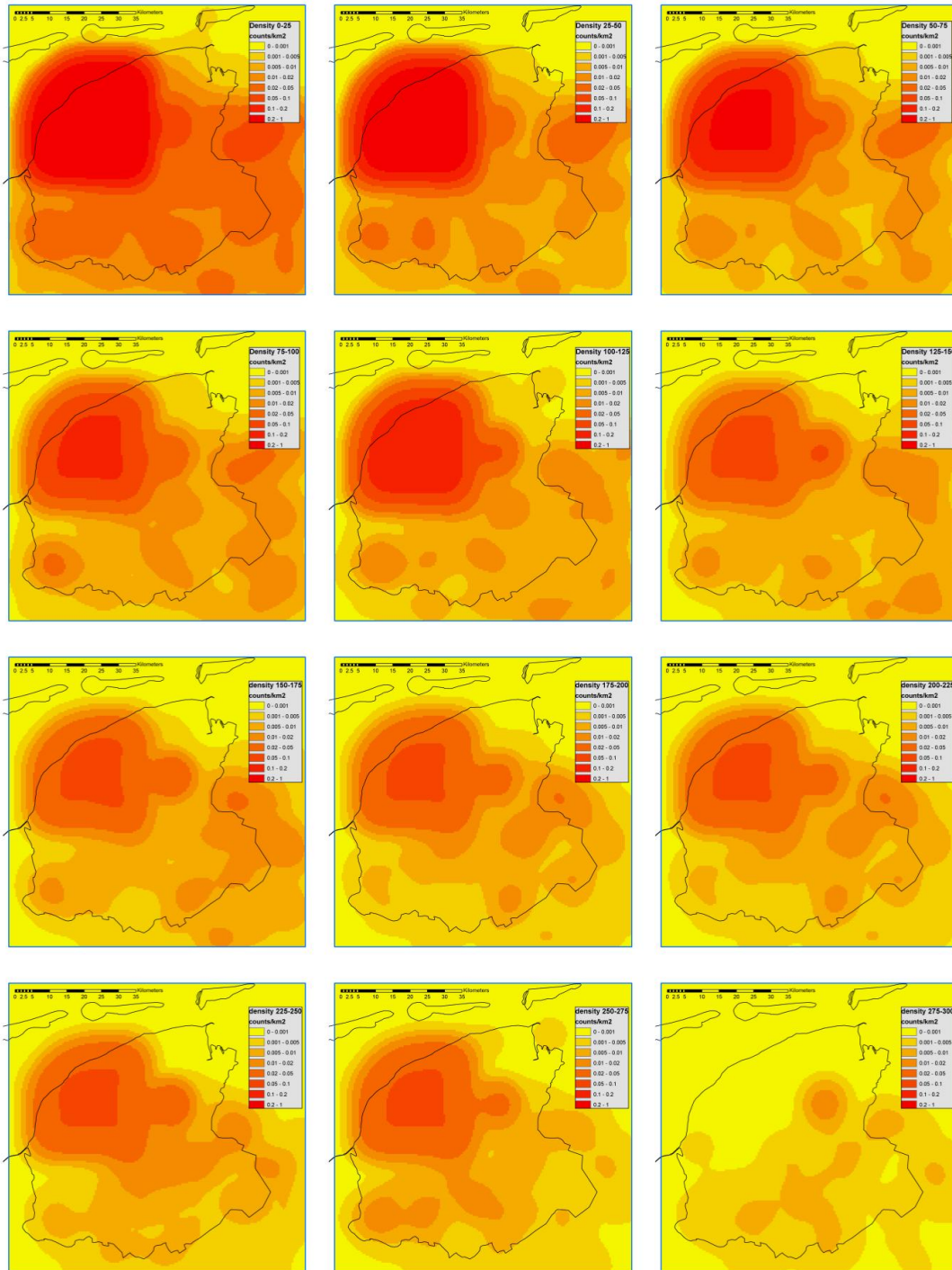
*De resultaten van de opdracht zijn bestemd voor de Provincie Fryslân, conform de opdracht. De grootst mogelijke zorgvuldigheid wordt betracht bij het samenstellen van de resultaten van de onderzoeksopdracht in de vorm van zoet-zout grensvlakkaarten. Deltares aanvaardt als opdrachtnemer geen aansprakelijkheid voor schade, van welke aard ook, ontstaan ten gevolge van omstandigheden die buiten de risicosfeer van Deltares vallen, dan wel waar Deltares geen directe invloed op heeft.*

## 6 Referenties

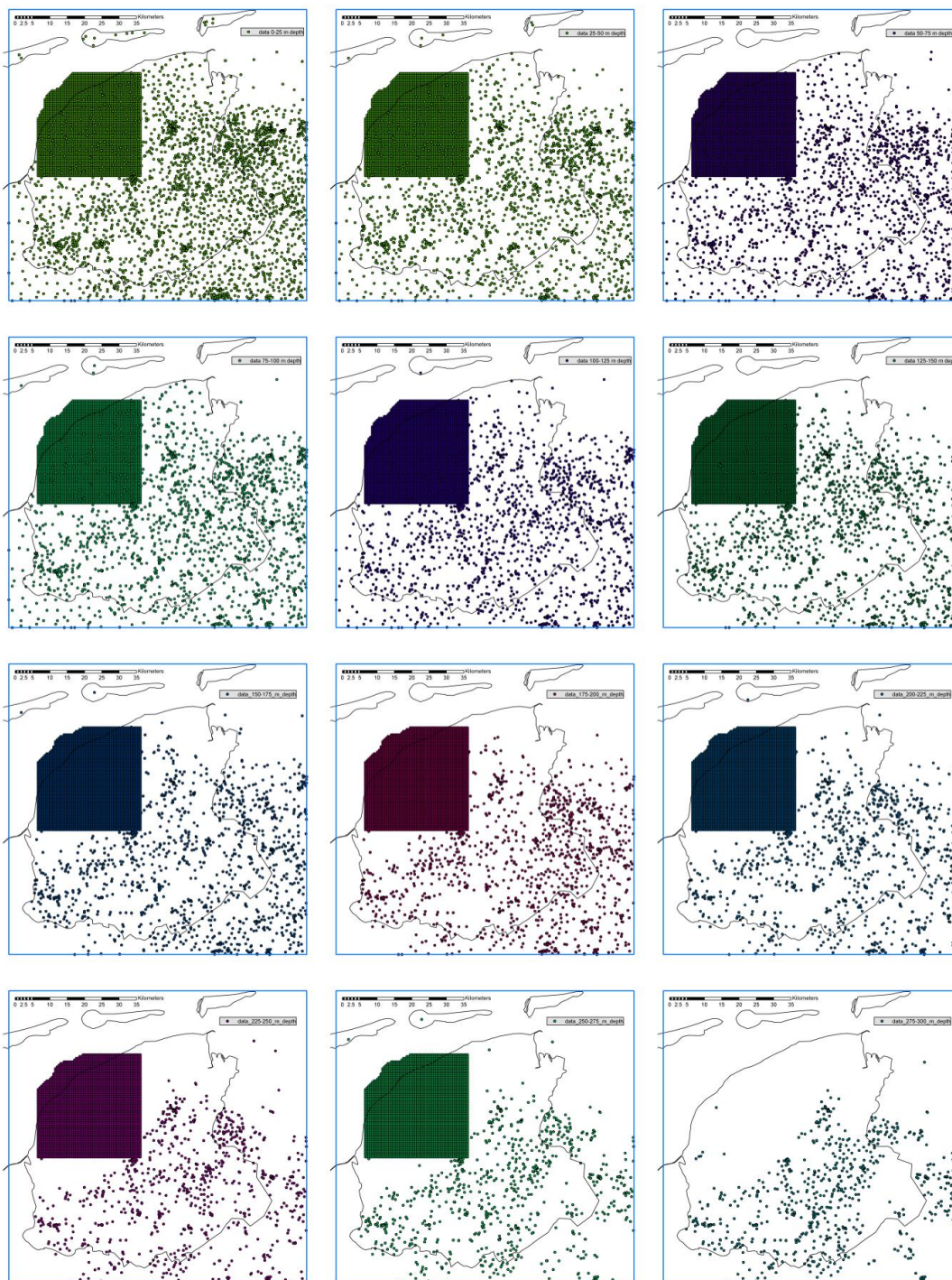
1. Van Baaren, E. S., Delsman, J. R., Pauw, P. S., Karaoalis, M., Dabekaussen, W., Gunnink, J. L. and Siemon, B.: FRESHEM Kanaalzone Gent- Terneuzen: 3D zoet-brak-zout kartering van het grondwater, rapport 1209220., 2016.
2. Van Baaren, E. S., Delsman, J. R., Karaoalis, M., Pauw, P. S., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Dabekaussen, W., Gunnink, J. L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Siemon, B., Steuer, A. and Meyer, U.: FRESHEM Zeeland - FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland, Utrecht, Netherlands., 2017.
3. Cliwat: Groundwater in a Future Climate., 2011.
4. Delsman, J. R.: Saline groundwater – surface water interaction in coastal lowlands, Vrije Universiteit Amsterdam., 2015.
5. Delsman, J. R. and Oude Essink, G. H. P.: Kwantitatieve effecten peilstijging Lauwersmeer - Een onderzoek naar de effecten van een nieuw peilbeheer., 2008.
6. Delsman, J. R., Hu-a-ng, K. R. M., Vos, P. 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, 2014a.
7. Delsman, J. R., Hu-A-Ng, K. R. M. R. M., Vos, P. C. C., De Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Stuyfzand, P. J. P. J. 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, 2014b.
8. 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.
9. Faneca Sánchez, M., Bashar, K., Janssen, G. M. C. M., Vogels, M., Snel, J., Zhou, Y., Stuurman, R. J. and Oude Essink, G. H. P.: SWIBANGLA: Managing salt water intrusion impacts in coastal groundwater systems of Bangladesh., 2015.
10. Goes, B. J. M. and Vernes, R. W.: REGIS Zeeland, Deelrapport C: Zoet, brak en zout grondwater., 2010.
11. Kooi, H. and Groen, J.: Offshore continuation of coastal groundwater systems; predictions using sharp-interface approximations and variable-density flow modelling, , 246, 19–35, 2001.
12. Kooi, H., Groen, J. and Leijnse, A.: Modes of seawater intrusion during transgressions, *Water Resour. Res.*, 36(12), 3581–3589, doi:10.1029/2000WR900243, 2000.
13. 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.
14. 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.
15. Oude Essink, G. H. P.: MIPWA - zoetzout., 2006.
16. Oude Essink, G. H. P.: Zoet-zout kaarten ondergrond Provincie Zuid-Holland., 2017.
17. Oude Essink, G. H. P. and Verkaik, J.: NHI zoet-zout: grondwater in het Nederlandse kustgebied., 2010.
18. Oude Essink, G. H. P., De Louw, P. G. B., Van Vliet, M., Van Baaren, E. S., Goes, B. J. M., Prevo, C., Sergi, F., Marconi, V., Vos, P. and Post, V. E. A.: Zoet-zout studie Provincie Flevoland, TNO Bouw en Ondergr., 118, 2008.
19. Pham, V. H., Van Geer, F., Bui, T. V., Dubelaar, W., Van, P. D. T. and Oude Essink, G. H. P.: Paleo-hydrogeological reconstruction of the fresh-saline groundwater distribution in the Vietnamese Mekong Delta since the late Pleistocene, *Submitt. to J. Hydrol.*, 2016.
20. Post, V. E. A.: Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene, Vrije Universiteit Amsterdam., 2004.

21. Siemon, B., Van Baaren, E. S., Dabekaussen, W., Delsman, J. R., Karaoulis, M., De Louw, P. G. B., Pauw, P. S., Vermaas, T., Bootsma, H., Steuer, A., Gunnink, J. L., Oude Essink, G. H. P. and Meyer, U.: Frequency-domain helicopter-borne EM survey for delineation of the 3D Chloride Distribution in Zeeland, the Netherlands, in 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics., 2017.
22. TNO-IGG: Inleiding in geofysisch boorgatmeten, een praktische cursus voor grondwater onderzoek., 1992.
23. Vermeulen, P. T. M., Burgering, L. M. T., Roelofsen, F. J., Minnema, B. and Verkaik, J.: iMOD User Manual., 2017.

## A Initiële chloride concentratie verdelingen



Figuur A1: Geïnterpoleerde data dichtheid (kernel density) over verschillende intervallen: eenheid aantal punten per km<sup>2</sup> (alle punten worden opgeteld binnen een straal van 5km, gedeeld door het cirkel oppervlakte met 5km straal).



Figuur A2: Dichtheid (kernel density) over verschillende intervallen: ruimtelijke positie per datapunt.