

# Zoutindringing - Geofysische meetsimulaties bij Kornwerderzand



## Zoutindringing - Geofysische meetsimulaties bij Kornwerderzand



AI Interpretatie van “Zoutindringing in oppervlakte water nabij een sluis in Nederland”

**Auteur(s)**  
Roeland Nieboer  
Eline Leentvaar

## Zoutindringing - Geofysische meetsimulaties bij Kornwerderzand

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening
<b>Contactpersoon</b>	Marc Hartogs
<b>Trefwoorden</b>	Zoutindringing, geofysica, elektrische weerstand tomografie

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	06-05-2025
<b>Projectnummer</b>	11210325-008
<b>Document ID</b>	-
<b>Pagina's</b>	32
<b>Classificatie</b>	Openbaar
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Roeland Nieboer	Eline Leentvaar
--	-----------------	-----------------

# Samenvatting

Deze studie evalueert door middel van meetsimulaties de toepasbaarheid van Electrical Resistivity Tomography (ERT) voor het monitoren van zoutintringing in oppervlaktewater, met de focus op het sluiscomplex bij Kornwerderzand, de beoogde locatie voor een veldproef. De opzet van een veldproef valt buiten dit onderzoek.

De toenemende bedreigingen door zoutinrusie, versterkt door klimaatverandering, vereisen effectieve monitoringsmethoden om drinkwater, landbouw en ecosystemen te beschermen. Om ERT-methode te optimaliseren voor de situatie bij Kornwerderzand, zijn geofysische metingssimulaties uitgevoerd met behulp van inputdata van het D-HYDRO-model in combinatie met varende temperatuur metingen met behulp van CTD sondes.

De doelstellingen van dit onderzoek zijn: het begrijpen en kwantificeren van onzekerheden die inherent zijn aan de ERT methode, het optimaliseren van meetconfiguraties, en het evalueren van het potentieel van ERT-gegevens als invoer ter verbetering van D-HYDRO-modellen.

De studie vergelijkt systematisch de effectiviteit van verschillende elektroden configuraties en elektrodenafstanden met als doel het in beeld brengen van de zoet-zout verdeling door middel van simulaties met homogene en multi-laags zoutmodellen. Eerdere bevindingen geven aan dat ERT geschikt is voor het detecteren van significante saliniteitscontrasten, met name het identificeren van een zouttong aan de basis van de waterkolom. Echter, uitdagingen blijven bestaan in het oplossen van fijne stratificatie (centimeterschaal). De resultaten uit de simulatie in een constante zoutomgeving geeft afwijking van ongeveer  $\pm 0,1$  PSU. De robuustheid van de ERT methode werd verder gevalideerd door de beoordeling van de resultaten bij het ontbreken van een enkele elektrode. Dit gaf nog steeds betrouwbare resultaten.

De SaltSimulator is een open-source Python-pakket ontwikkeld in deze studie. Deze ontwikkeling draagt bij aan de reproduceerbaarheid van de simulaties en resultaten, en ondersteund toekomstige onderzoeksprojecten.

Bij Kornwerderzand staat een meetcampagne gepland, hierbij wordt aangeraden een elektrodenafstand van 2 m met een Schlumberger-array te toe gebruiken, terwijl een "slimme mesh" wordt geïntegreerd voor verbeterde inversieresultaten in gebieden gekenmerkt door hoge zoutgradiënten.

Dit resultaten van de meetsimulaties laten duidelijk zien de ERT methode goed werkt om de zoutverdeling in de waterkolom goed in kaart te brengen. Er zijn echter ook duidelijk beperkingen die in deze studie goed onderzocht en waar mogelijk gekwantificeerd zijn, waar ook uit blijkt dat de methode kansrijk is voor het meten van zoutintringing.

De aanbevelingen in dit rapport vormen de basis voor het opzetten van een meetplan voor zoutintringing bij de Lorentzsluizen van Kornwerderzand, de schutssluisen tussen de Waddenzee en het IJsselmeer aan de noordwestkant van de afsluitdijk.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Motivatie	6
1.2	Doel	6
<b>2</b>	<b>Methode</b>	<b>7</b>
2.1	Meetmethode ERT	7
2.2	Situering Kornwerderzand en modelinput	7
2.3	Data simulatie en inversie	10
2.4	Simulatievariabelen	11
2.5	Meetconfiguraties	11
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>12</b>
3.1	Homogeen model	13
3.2	Zes-lagenmodel	15
3.3	Groter en kleiner saliniteitscontrast	16
3.4	Effect van elektrodenafstand	17
3.5	Effect lengte en afstand op duur metingen	18
3.6	Effect kapotte elektrode	19
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>21</b>
4.1	Meetsimulaties	21
4.2	Aanbevelingen voor optimalisatie meetopstelling voor Kornwerderzand	22
4.3	Haalbaarheid voor input voor D-HYDRO	22
<b>5</b>	<b>Reproduceerbaarheid</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Bijlage</b>	<b>25</b>
7.1	Uitleg meetconfiguraties	25
7.2	Resultaten andere meetconfiguraties	28

# 1 Inleiding

## 1.1 Motivatie

Zoutindringing in oppervlaktewateren vormt een groeiende bedreiging voor drinkwatervoorziening, landbouw en ecosystemen. Hogere zoutconcentraties vermoeilijken de desalinisatie van ons drinkwater, verlagen de kwaliteit van irrigatiewater en hebben mogelijk een negatief effect op de biodiversiteit.

Zeewater dringt via open riviermondingen en sluizen (maar ook als kwel door het grondwater) het zoetwatersysteem binnen. Dit proces wordt versterkt door klimaatverandering, die leidt tot lagere rivierafvoeren tijdens droge zomers en zeespiegelstijging.

In dit onderzoek wordt onderzocht hoe we door op strategische plekken, door middel van geofysisch tomografische metingen, de verdeling van zout over de waterkolom kunnen monitoren. Deze metingen zijn aanvullend op bestaande puntmetingen van Rijkswaterstaat omdat tomografie informatie verschaft over de verdeling van het zout. Zo kan bijvoorbeeld een 'zouttong' op de bodem gemeten worden die in een puntmeting gemist kan worden.

Als onderdeel van dit meerjarig onderzoek is in 2022 een innovatieve veldproef opgezet waar tomografie met elektrische weerstand alsmede akoestische tomografie met glasvezel uitgevoerd in Zijkanaal C onder de brug met de A9 bij Spaarndam (Nieboer et al., 2023). De resultaten hieruit waren veelbelovend voornamelijk voor de elektrische weerstand tomografie (ERT), maar kwalificeren van de onzekerheden bleek een uitdaging.

Buiten het directe gebruik van de verkregen tomografische metingen voor inzicht in zout, is het wellicht mogelijk om deze data als input te gebruiken voor het verbeteren van bestaande modellen voor zoutindringing. Bijvoorbeeld door deze metingen mee te nemen als randvoorwaarden bij het gebruik van de 'Zeesluisformulering' gebruikt in het D-HYDRO model (Weiler et al., 2018)

In 2024 zijn er interviews met potentiële gebruikers gevoerd en hier kwam een sterke interesse uit naar voren om meer inzicht te krijgen in zoutindringing bij het Kornwerderzand sluizencomplex.

## 1.2 Doel

Om meer inzicht te krijgen in de onzekerheden van de ERT meetmethode zijn in 2024 geofysische meetsimulaties uitgevoerd voor de beoogde meetlocatie bij Kornwerderzand. Een realistische verdeling van zout in de water kolom is gebaseerd op een aantal realisaties van het D-HYDRO model in combinatie met een serie varende metingen uitgevoerd met CTD sondes. De volgende doelen geformuleerd voor de simulaties 2024:

- *Meetsimulaties* om inzicht in onzekerheden van de methode te krijgen.
- *Aanbevelingen* voor optimalisatie van de beoogde meetopstelling voor Kornwerderzand (simpeler, goedkoper).
- *Haalbaarheid* voor input voor D-HYDRO modellen met betrekking tot zeesluisformulering bepalen.

## 2 Methode

Uit de veldproef zoals uitgevoerd bij Zijkanaal C is gebleken dat elektrisch weerstand tomografie in combinatie met glasvezeltemperatuurmetingen beter geschikt is voor het in kaart brengen van de zoutverdeling in een waterkolom dan akoestische tomografie (Nieboer et al., 2023).

Omdat het vertalen van de data naar realistisch zoutgehaltes, en het duiden van de onzekerheden van de uitgevoerde ERT metingen nog een uitdaging waren is besloten om meetsimulaties uit te voeren om dit onderzoeken.

De volgende vragen met betrekking tot de potentie van ERT zijn gedefinieerd:

- Hoe nauwkeurig kan een waterkolom met een constante saliniteit worden gemeten?
- In hoeverre contrast in saliniteit kan worden bepaald door de metingen?
- Met welke nauwkeurigheid kunnen stratificaties in beeld worden gebracht, wat is de verticale resolutie?
- Wat voor effect heeft een of meerdere defecte elektrode(n) op de metingen?
- Wat voor effect heeft het aanpassen van de elektrode afstand op (1) de meetresultaten en (2) de meetduur (dit laatste bepaald de tijdsresolutie)?

### 2.1 Meetmethode ERT

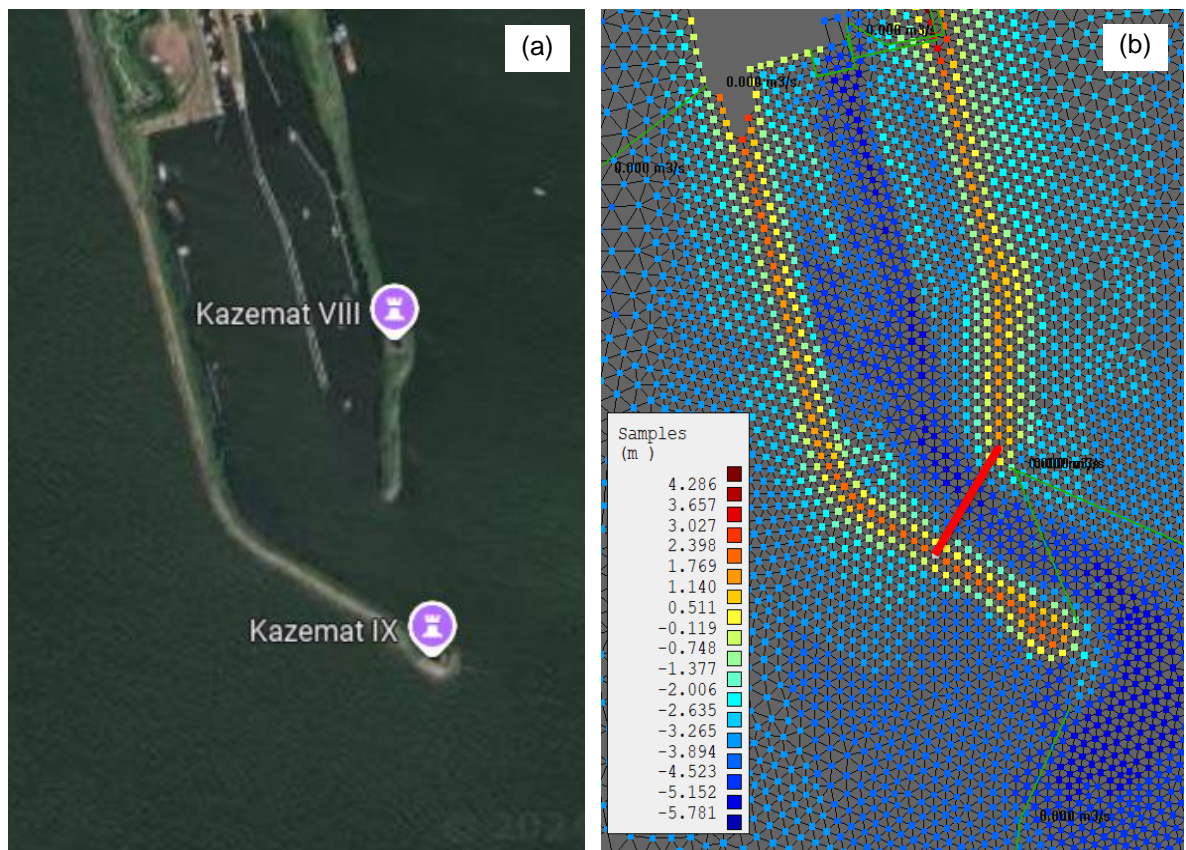
Electrical Resistivity Tomography, (ERT) Elektrische weerstand tomografie in het Nederlands, is een geofysische techniek waarbij elektrische stroom wordt geïnjecteerd in de grond en de resulterende spanningen worden gemeten aan het oppervlak. Deze metingen bieden informatie over de elektrische weerstand van het gemeten oppervlak.. ERT wordt veelal gebruikt voor metingen met betrekking tot de ondergrondstructuur, maar kunnen ook worden toegepast voor metingen in een waterkolom. De saliniteit van water heeft een directe invloed op de elektrische geleidbaarheid, aangezien zout water een hogere geleidbaarheid vertoont dan zoet water. Elektrische geleidbaarheid is de inverse van elektrische weerstand, wat wordt gemeten met ERT. Dit maakt ERT een in potentie een goede techniek om de saliniteit in een waterkolom te monitoren, omdat de gemeten elektrische weerstand een indicatie geeft van de zoutconcentraties op verschillende dieptes in het water. Een veel uitgebreidere omschrijving van de methode is opgenomen in het meetplan van de veldproef bij Zijkanaal C (Nieboer et al, 2021). Door de ERT techniek aan te vullen met glasvezeltemperatuurmetingen over de bodem kan onderscheid gemaakt worden tussen het effect op veranderingen in temperatuur en die van de elektrische weerstand waar we geïnteresseerd in zijn. Daarnaast is de temperatuur essentieel voor het omrekenen van de elektrische weerstand (gemeten door de ERT) naar saliniteit.

### 2.2 Situering Kornwerderzand en modelinput

Het uitvoeren van meetsimulaties – computergestuurde metingen op een model – geeft een indicatie over hoe de metingen en de gebruikte meetopstelling de situatie in het model in kaart brengen. De simulaties houden rekening met de specifieke geometrie van de sluis, de verdeling van de saliniteit, temperatuur, en de daarmee geassocieerde elektrische eigenschappen van het water. Door middel van ERT-simulaties kunnen we de elektrische velden berekenen die zich verspreiden door het water, afhankelijk van de variaties in de zoutconcentratie, en zo een nauwkeurig beeld van de saliniteit over de waterkolom verkrijgen.

In de context van het Kornwerderzand gebied wordt het D-HYDRO-model gebruikt als input voor de simulaties. Dit model biedt een gedetailleerde representatie van de waterkolom bij de Lorentzsluisen bij Kornwerderzand, waarin de simulatiepunten zijn gekoppeld aan specifieke saliniteitswaarden. Door gebruik te maken van D-HYDRO kan de dynamiek van de waterkolom op verschillende diepten nauwkeurig worden gerepresenteerd in het model.

De D-HYDRO data is een verzameling van datapunten over een 2D vlak gekozen over de Lorentzsluisen bij Kornwerderzand. Het bovenaanzicht van de sluisen en het model zijn getoond in Figuur 2.1a en b. De rode lijn in b geeft aan welke data gebruikt wordt voor de simulatie.



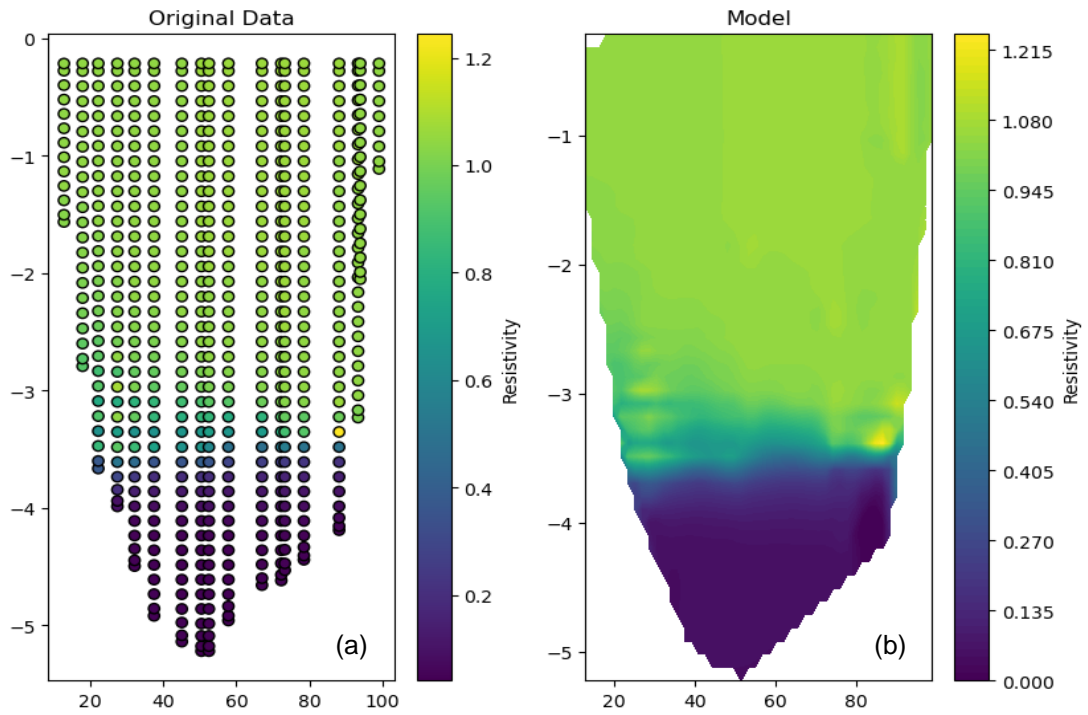
Figuur 2.1: a. Satelliet beeld Lorentzsluis bij Kornwerderzand, b. D-HYDRO model gedeelte Lorentzsluis

Deze datapunten bevatten een horizontale locatie op de lijn (x) en een diepte (z), een temperatuur (T in graden Celsius) en een saliniteit (PSU). Voor de simulatie is het van belang dat de saliniteiten worden omgezet naar elektrische geleidbaarheid (S/m), en voor de ERT simulatie uiteindelijk naar elektrische weerstand (ohm-m).

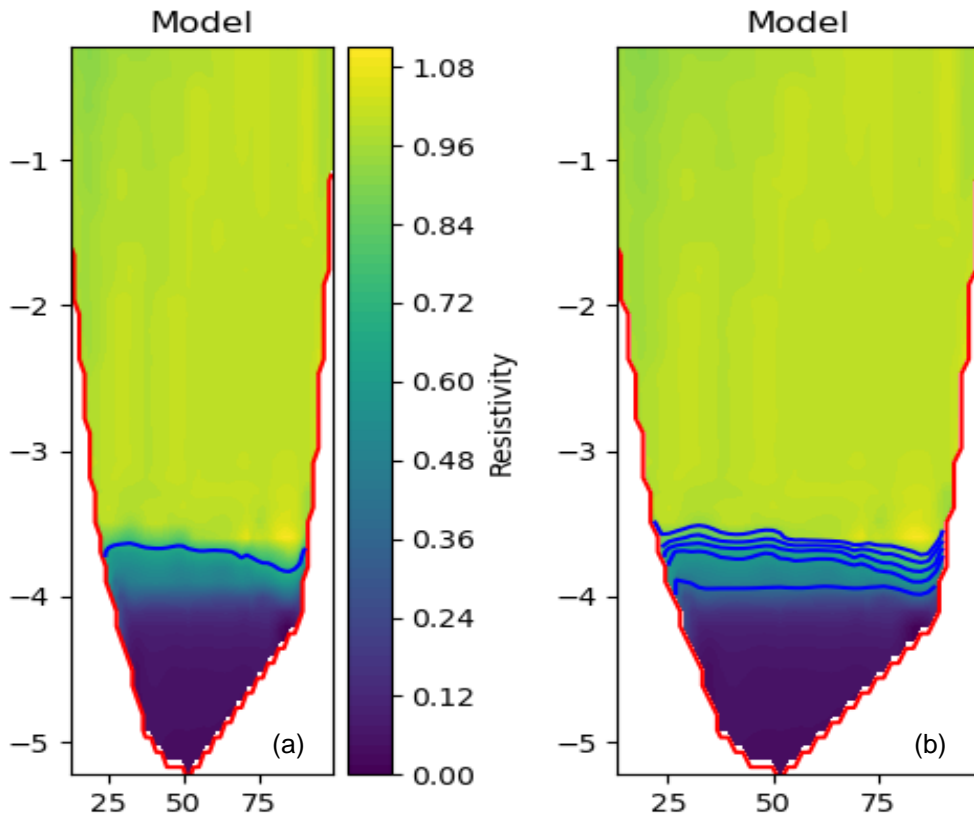
Voor het omrekenen van elektrische weerstanden naar saliniteit en vice versa maken we gebruik van de Practical Salinity Scale (PSS). Deze schaal is internationaal gestandaardiseerd en biedt een nauwkeurige manier om saliniteit te berekenen op basis van weerstandsmetingen, waarbij rekening wordt gehouden met temperatuur en druk (Lewis and Perkin 1981).

De datapunten uit het D-HYDRO model worden vervolgens geïnterpoleerd zodat over de hele waterkolom de saliniteit is gedefinieerd (Figuur 2.2). Dit vormt de basisinput voor de meetsimulatie. We simuleren de ERT metingen, waar de elektrodes op de bodem liggen. Hieruit wordt de simulatiedata verkregen die idealiter na verwerking, zo goed mogelijk de saliniteit over de waterkolom teruggeeft die we erin hebben gestopt.

Echter, we doen nog één stap om de input data verkregen uit het D-HYDRO model geschikt te maken voor de simulatie en de inversie van die data. Over de geïnterpoleerde waterkolom worden contourlijnen berekend. Deze contourlijnen geven aan waar in het model de saliniteit gelijk is. De contourlijnen worden gebruikt om het model op te knippen in kleinere lagen. Het simpelste model gebruikt een homogene saliniteit (geen zout-zoet verdeling). Meer modellen geven een complexer, maar ook een realistischer het model. Figuur 2.3 geeft de opdeling in (a) twee en (b) zes lagen. Door de scherpste van het contrast kan alvast worden geobserveerd dat de contouren zeer dicht op elkaar liggen.



Figuur 2.2: Datapunten uit het D-HYDRO model omgerekend van PSU en temperatuur (°C) naar elektrische weerstand (ohm-m) (a) en het geïnterpoleerde model (b) vormt de basis voor de simulatie



Figuur 2.3: Elektrische weerstand contouren (ohm-m) berekend uit de data van Figuur 2.2b delen de input voor de simulatie op in (a) 2 lagen en (b) 6 lagen. Omdat de overgang van zoet naar zout vrij scherp is liggen voor (b) de elektrische weerstand contouren (ohm-m) ook zeer dicht op elkaar.

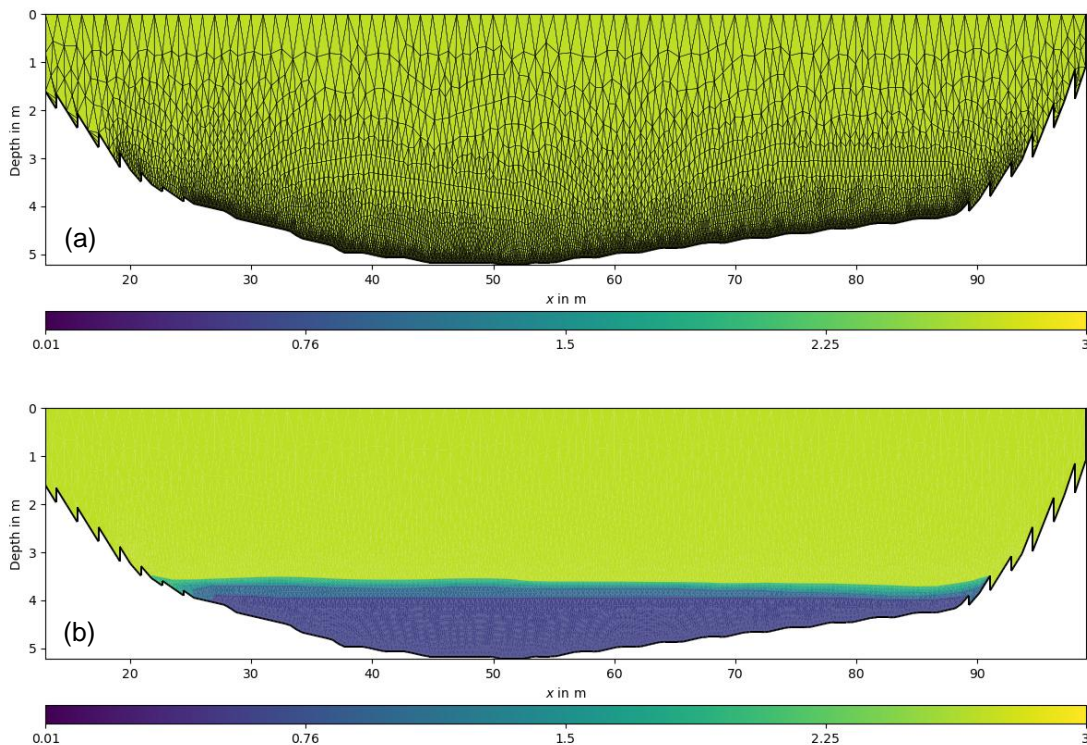
## 2.3 Data simulatie en inversie

Voor de simulatie is een inversiemodel gebouwd op basis van het D-HYDRO model. In dit model wordt de bathymetrie van de bedding bij de sluis automatisch uit het D-HYDRO modelresultaten gehaald en de verschillende contourlijnen kunnen worden geëxtraheerd.

Voor de simulaties is gekozen om (1) de homogene casus met alleen zoet water en (2) het zes-lagenmodel, van zoet naar zout op de bodem, door te rekenen. Homogeen en zes lagen zijn twee uitersten, waar de eerste een goed beeld geeft van de resolutie in zout (hoever wijken de waarden af van de input?) en de tweede van de verticale resolutie. Hierbij kan uit ervaring alvast gezegd worden dat het onwaarschijnlijk is dat de dunne laagjes (in centimeter/decimeter) schaal zullen worden herkreten uit de inversie. Toch wordt deze cases gekozen, omdat dit het beste de werkelijkheid weergeeft.

Figuur 2.4a laat de homogene elektrische weerstand verdeling zien in de waterkolom die is gebruikt voor de eerste meetsimulatie. Hier bovenop is de mesh weergegeven die is gebruikt voor de finite element berekening (het zogenaamde 'forward model'). Deze is zo gekozen omdat we weten dat er bijna geen variatie is in de bovenste 3.5 m zodat de elementen daar groter kunnen zijn. Bij de zoet-zout overgang moeten de elementen fijner zijn voor numerieke stabiliteit en hetzelfde geldt voor de locaties op de bodem waar de elektroden zijn geplaatst. De elektrodeposities zijn hier niet weergegeven maar wel in Figuur 3.1 in hoofdstuk 3.

Figuur 2.4b laat hetzelfde zien als Figuur 2.4a maar dan voor het zes-lagenmodel. De zes lagen zijn gedefinieerd door de originele model in Figuur 2.2b op te delen langs de contouren in Figuur 2.3b. De met de weerstand en saliniteitswaarden van de lagen zijn gepresenteerd in Tabel 2.1. Het mesh voor dit forward model is hier ook weer bovenop geplott, maar in het wit dus het is minder goed zichtbaar (in Figuur 3.1 beter zichtbaar).



Figuur 2.4: Homogeen (a) en 6 lagenmodel (b) met weerstandswaarden (ohm-m) met voor beide hetzelfde mesh voor het forward model er bovenop geplott (voor b in het wit dus minder goed zichtbaar).

Tabel 2.1: input waarden zes-lagen model

Laag	Weerstand (Ohm-m)	Saliniteit (PSU)
1	2.3	0.62
2	2	0.71
3	1.8	0.79
4	1.5	0.95
5	1.3	1
6	1	1.5

De simulatie- elektroden worden op de bodem op de gewenste afstand geplaatst en door middel van een forward model wordt hier simulatiedata van gemaakt. Simpel gezegd doe je ‘digitale’ metingen op een vooraf bekende saliniteitsverdeling (dus uit het D-HYDRO model) en de uitkomst is een dataset die je ook zou krijgen als je in het veld metingen zou doen.

De volgende stap in het proces is dat deze data op eenzelfde manier wordt behandeld als eventuele velddata. Deze dataset bevat, net zoals velddata, een standaard ruis in het signaal. De data wordt geïnverteerd op een onbekend medium, en in dit geval op een waterkolom met onbekende saliniteitswaarden. Deze inversie berekent, vanuit de gemeten data, het meest waarschijnlijke bijpassende ondergrondmodel. Waar we in de simulatie dus van model naar data rekende, rekenen we hier terug van data naar model. Door het geïnverteerde model te vergelijken met onze ‘werkelijke’ ondergrond (hier is dat het model uit Figuur 2.2), kan worden nagegaan of de meetstrategie gebruikt voor de simulatie een juist en volledig beeld van de ondergrond geeft en of de gewenste targets (in dit geval de zoet-zout grens én saliniteitswaarden) goed worden gemeten.

## 2.4 Simulatievariabelen

ERT is een methode die flexibel en divers in kan worden gezet. Zo zijn het elektroden aantal, de onderlinge afstand tussen de elektroden en de meetconfiguratie een aantal van de te variëren parameters zoals de gebruikte stroomsterkte die de uitkomst van de metingen erg kunnen beïnvloeden. Voor deze simulaties zullen wij in eerste instantie uit gaan van het gebruik van 64 elektroden die met een onderlinge afstand van 1 meter over de bodem worden geplaatst. Hierbij zal de kabel zo veel mogelijk in het midden van de rivier liggen en daardoor vooral de diepste stukken van de vaargeul in beslag nemen. De meetconfiguratie en het aantal metingen zullen de belangrijkste variabelen van de meetopstelling zijn in deze studie.

## 2.5 Meetconfiguraties

Er zijn verschillende standaard meetconfiguraties voor de ERT metingen die elk specifieke toepassingen en voordelen hebben. Deze meest gebruikte meetconfiguraties zijn uiteengezet in bijlage 7.1.

De keuze voor een specifiek meetsimulatie-schema hangt af van de doelen van de metingen, de vereiste diepte van de metingen, en de verwachte heterogeniteit van de ondergrond.

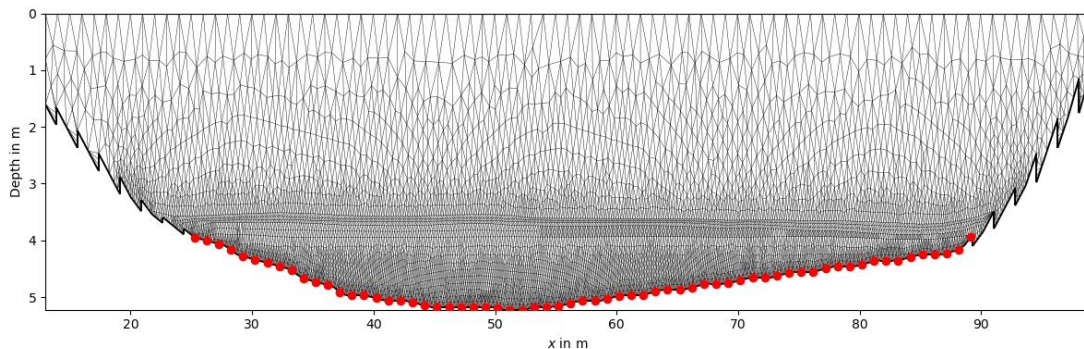
Omdat de meetresultaten uit de configuraties in de praktijk anders kunnen uitvallen dan in de theoretisch beschrijving, door de invloed van de mediumparameters, is het van belang de meetstrategie te testen in een simulatie. Hoewel dit veel informatie verschaft is het uiteindelijk toch raadzaam om tijdens de werkelijke metingen alsnog een aantal configuraties te vergelijken. Alvorens een definitieve opstelling te bepalen. Dit is vrij makkelijk uit te voeren en aan te passen op afstand.

### 3 Resultaten

Bij simulaties en interpretaties van ERT- data wordt de gesimuleerde data als eerste weergegeven in een zogenaamde pseudosectie (zie voor uitleg bijlage 7.2). Een pseudosectie biedt een eerste indruk van de verdeling van de elektrische weerstanden in het medium dat bemeten wordt. Deze weergave is echter niet direct een representatie van de werkelijkheid, omdat de gemeten data afhankelijk is van de elektrode afstanden, de bathymetrie en andere meetparameters.

Om de werkelijke eigenschappen van het gemeten medium beter te begrijpen, wordt een inversie uitgevoerd op de gegevens. Tijdens dit proces worden de data gebruikt om een model te berekenen dat de gemeten waarden zo goed mogelijk verklaart. Dit resulterende model geeft een schatting van de werkelijke eigenschappen van het gemeten medium, zoals variaties in weerstand, en vormt de basis voor verdere interpretatie. In deze resultaten zullen wij ons voornamelijk focussen op de inversieresultaten, en niet op de pseudosecties. De inversieresultaten kunnen makkelijker worden vergeleken met de inputdata, omdat deze een representatie laten zien van de data in de gemeten omgeving, waar een pseudosectie alleen de metingen laat zien in een relatief diepte en breedtebereik.

De basis simulaties worden gerund met 64 elektrodes op de bodem met een onderlinge afstand van 1 meter (Figuur 3.1).



*Figuur 3.1: mesh gebruikt voor de zes-lagen simulatie. In rood zijn de posities van de 64 elektrodes op de bodem (dwarsdoorsnede) weergegeven, met 1 meter afstand van elkaar.*

Omdat de verschillen klein zijn tussen de verschillende meetconfiguraties is voor de overzichtelijkheid van dit rapport alleen de ‘Schlumberger’ configuratie in de hoofdtekst gepresenteerd. De resultaten uit de ‘dipole-dipole’ en ‘wenner’ configuraties zijn opgenomen in 7.2.

Dat er weinig verschil is kan verklaard worden door twee factoren. Ten eerste betreft de waterkolom een geleidend medium, waardoor het spatiële bereik van de metingen geen beperkende factor is. Dit is bij metingen in andere media zoals de ondergrond, waarbij de weerstanden veel hoger liggen, wel het geval zijn. Ten tweede is het algemene meetbereik ook klein vergeleken metingen die veelal op de ondergrond worden gedaan. Gezien ERT potentieel een dieptebereik heeft van 30 tot 50 meter, is de maximale hoogte van de waterkolom, ~ 5 meter (en gefocust hier op de zout-zoet grens tot 3 meter) geen beperkende factor. Dit is te meten met de meeste meetconfiguraties, ook al zijn de Schlumberger en dipole-dipole methoden theoretisch meer geschikt voor diepere structuren.

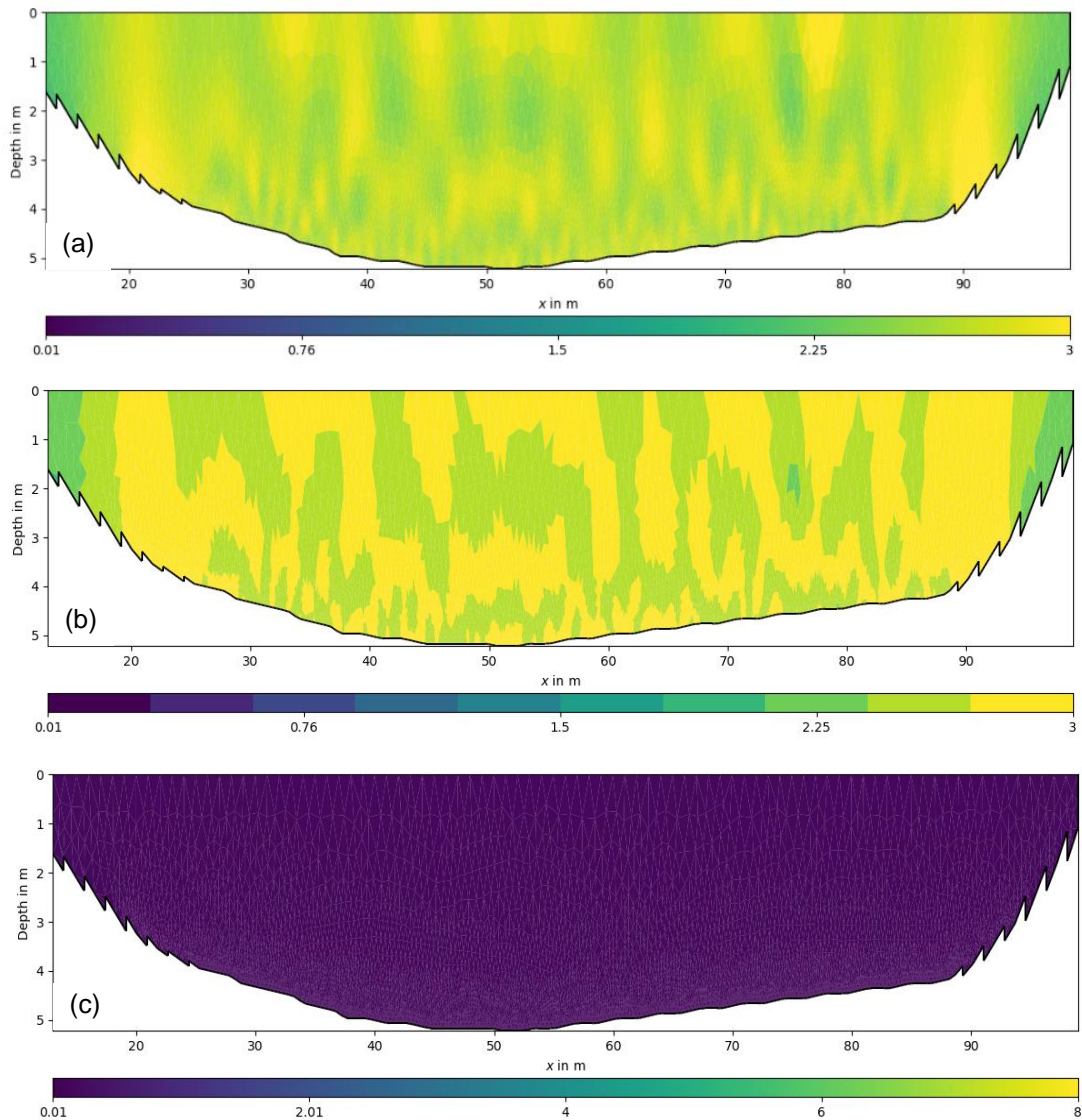
Om alle inversieresultaten goed met elkaar te kunnen vergelijken is er voor gekozen om bijna overal dezelfde kleurschalen te gebruiken. Soms is dit niet optimaal voor een specifiek figuur, en resulteert dit in een klein kleurverschil.

### 3.1 Homogeen model

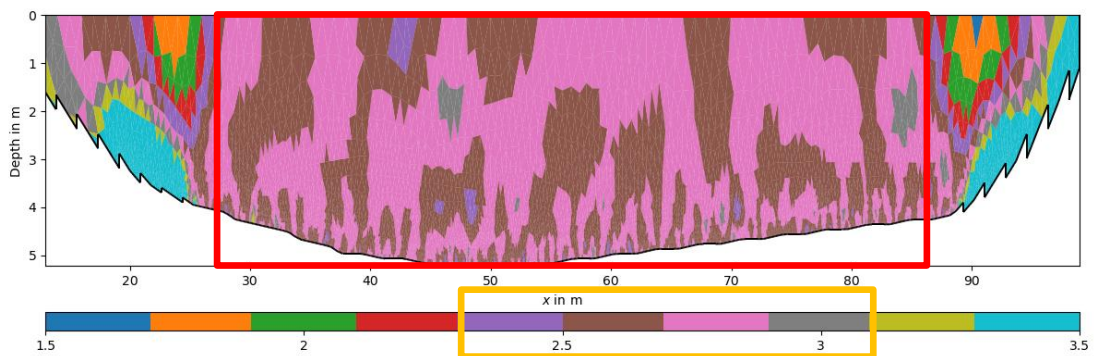
De inversie van het homogene model zou in het ideale geval een monochroom groen gekleurd resultaat opleveren zoals in Figuur 2.4a. Zoals verwacht is het resultaat vrij uniform maar niet perfect zoals te zien is in onderstaand Figuur 3.2. In (a) zien we het inversieresultaat weergegeven met een continue kleurschaal, van de gesimuleerde data van een homogene waterkolom met een elektrische weerstand van 2.7 ohm-m, wat overeenkomt met een saliniteit van 0.53 PSU. In (b) zien we hetzelfde maar is er een kleurbalk gebruikt die overgangen in weerstand in discretere stappen weergeeft. In (c) is hetzelfde resultaat omgezet naar saliniteit in PSU. Dit is een voorbeeld waar de kleurbalk niet zo nuttig is, zoals hierboven toegelicht.

Door in het inversieresultaat naar de afwijking van de homogene saliniteit te kijken verkrijgen we een indicatie van de zoutresolutie. Als we in het horizontale meetbereik (van ~30 tot 85 m) van de elektrodes naar de elektrische weerstanden kijken zien we dat de waardes tussen 2.3 en 3.1 ohm-m vallen. Ten opzichte van het verwacht 2.7 ohm-m is dit dus +/- 0.4 ohm-m. Omgezet naar saliniteit komt dit overeen met saliniteitswaarden tussen 0.43 en 0.63 PSU. Dit is dus +/- 0.1 PSU ten opzicht van de verwachte 0.53 PSU dat als homogene input is gebruikt.

Om dit visueel beter weer te geven is in Figuur 3.3 nog een keer de weerstandsverdeling weergegeven uit de inversie met een discrete, maar nauwere kleurenbalk dan in Figuur 2.4b. Eén kleurbalkje representeert 0.2 ohm-m. Het meetbereik is aangegeven met een rood vierhoek. Hierbinnen vallen alle waarden in 4 balkjes (paars en grijs zijn uitersten), dus 0.8 ohm-m wat overeenkomt met +/- 0.4 ohm-m afwijking. Buiten het meetbereik is natuurlijk geen dekking en daar lopen de afwijkingen dan ook snel op tot onrealistische waarden.



Figuur 3.2: Inversie resultaat voor de homogene casus met (a) een continue kleurschaal, (b) discrete keurschaal met stappen van 0.3 ohm-m en (c) het resultaat omgerekend naar saliniteit in PSU.

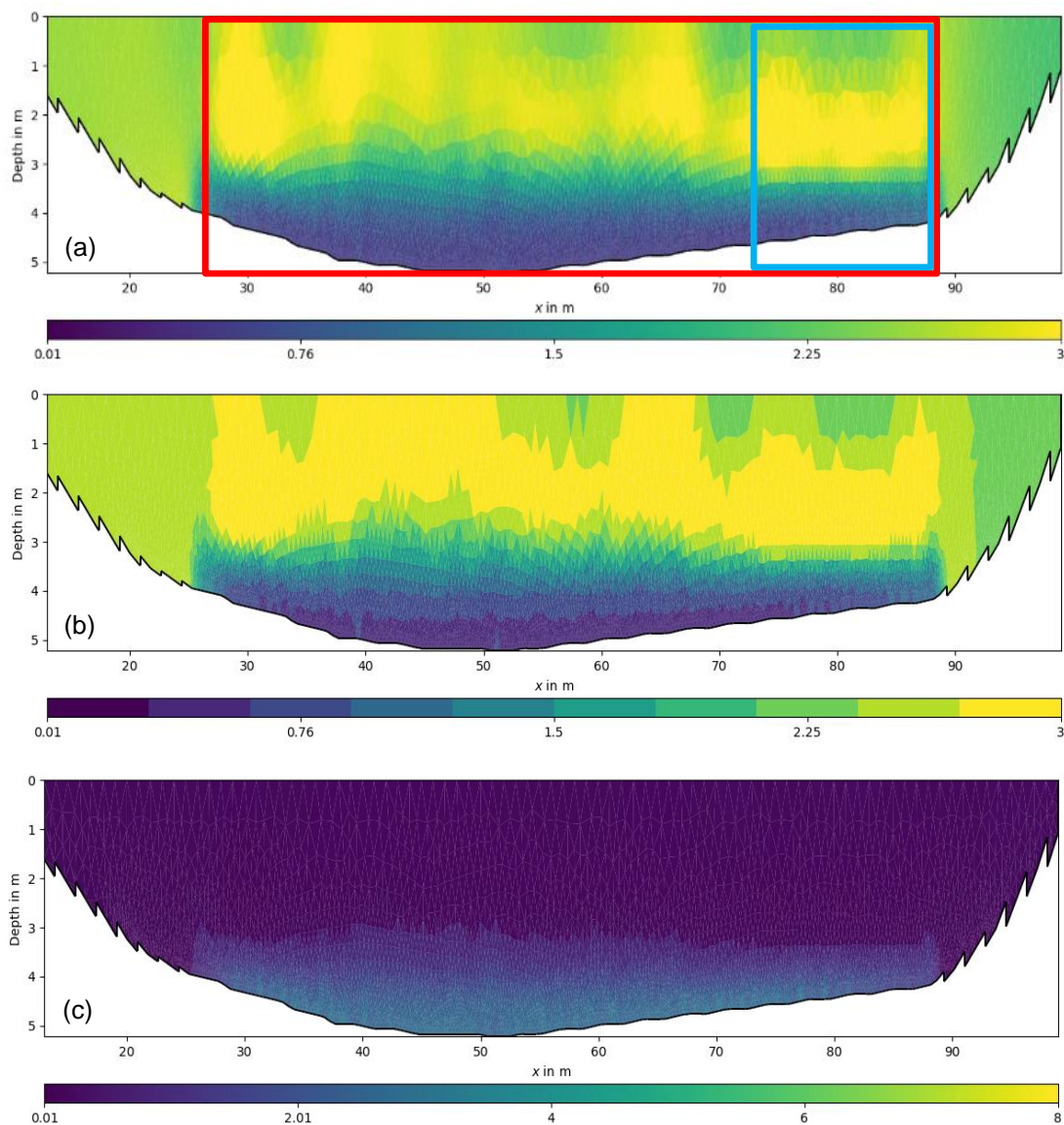


Figuur 3.3: Hetzelfde inversie resultaat als in Figuur 3.2 maar met een ander discrete kleurschaal met stappen van 0.1 ohm-m, om het bereik (en daarmee de error) van het inversieresultaat meer te benadrukken. Het rode vierhoek laat het meetbereik zien met volle dekking en het oranje het bereik welke waarden daarin worden waargenomen (2.4–3.2 ohm-m).

## 3.2 Zes-lagenmodel

Als het gedetailleerde zes-lagenmodel als input wordt gebruikt zoals weergegeven in Figuur 2.4b voor de simulatie en inversie, worden de resultaten in Figuur 3.4 verkregen. Zoals verwacht zijn in het inversie de zes lagen, die zeer dicht op elkaar liggen door de snelle overgang van zoet naar zout, niet van elkaar te onderscheiden. De methode is niet geschikt voor dit detailniveau, en het resultaat laat voornamelijk een overgang zien tussen zoet water tussen 0-3 m en de 'zouttong' op de bodem (3-5 m). De resultaten zijn alleen betrouwbaar in het meetbereik dat met de het rode vierhoek is aangegeven in Figuur 3.4a.

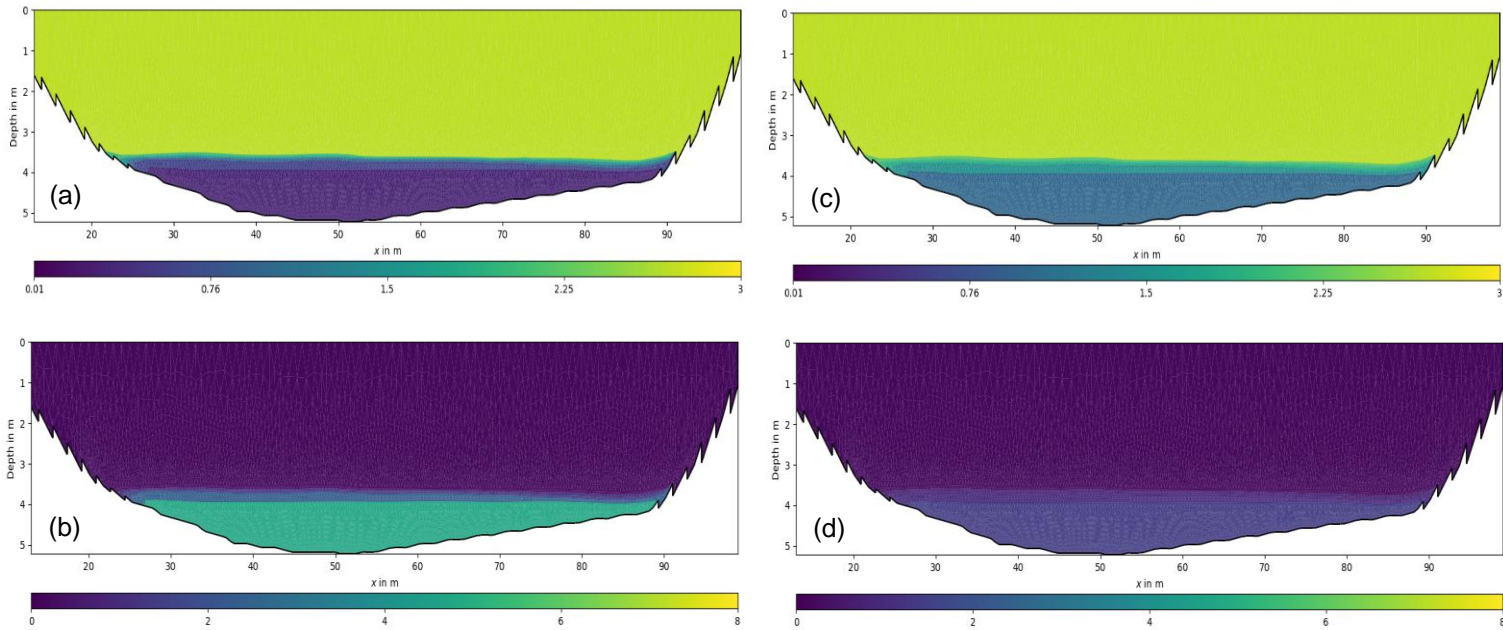
Als we het inversie resultaat naast de mesh leggen die is gebruikt voor de inversie (Figuur 2.4a), zien we hier duidelijk het effect van terugkomen. Dit is geen beperking van de meetmethode maar van het gekozen mesh. Een fijner mesh had een strakkere overgang gegeven, maar het kost dan ook veel meer tijd om de simulatie te draaien. Een slimmer mesh ontwerp, met meer focus op detail in het verticale waar de grootste variatie ligt, zou hier een betere keuze zijn geweest en zou over de hele breedte een beter gedefinieerde zoet-zout overgang hebben opgeleverd zoals te zien tussen 75-85 m (blauwe vierhoek) waar het mesh toevallig beter is gedefinieerd.



Figuur 3.4: Inversie resultaat voor de zes-lagen casus met (a) een continue kleurschaal, (b) discrete keurschaal met stappen van 0.3 ohm-m en (c) het resultaat omgerekend naar saliniteit in PSU.

### 3.3 Groter en kleiner saliniteitscontrast

In het vorige hoofdstuk hebben we kunnen zien dat de inversie van de ERT simulatiedata een duidelijke overgang laat zien tussen zoet en zout. Het detail van het zes-lagen model met snelle veranderingen op de centimeter schaal werd, zoals verwacht, niet meer terug verkregen. In dit hoofdstuk wordt gekeken hoe de inversieresultaten veranderen door een groter en een kleiner contrast te simuleren. Dit wordt gedaan door (1) de bodemlaag zouter te maken (Figuur 3.5a met waarden in Tabel 3.1 en Figuur 3.9) en (2) de bodemlaag minder zout te maken (Figuur 3.5b en Tabel 3.2 e) ten opzichte van het zes-lagen model van vorig hoofdstuk.



Figuur 3.5: model voor een groter contrast in saliniteit weergegeven in (a) weerstand ohm-m en (b) PSU) en model voor een kleiner contrast in saliniteit weergegeven in (c) weerstand ohm-m en (d) PSU).

Tabel 3.1: input waarden zes-lagen model (zouter)

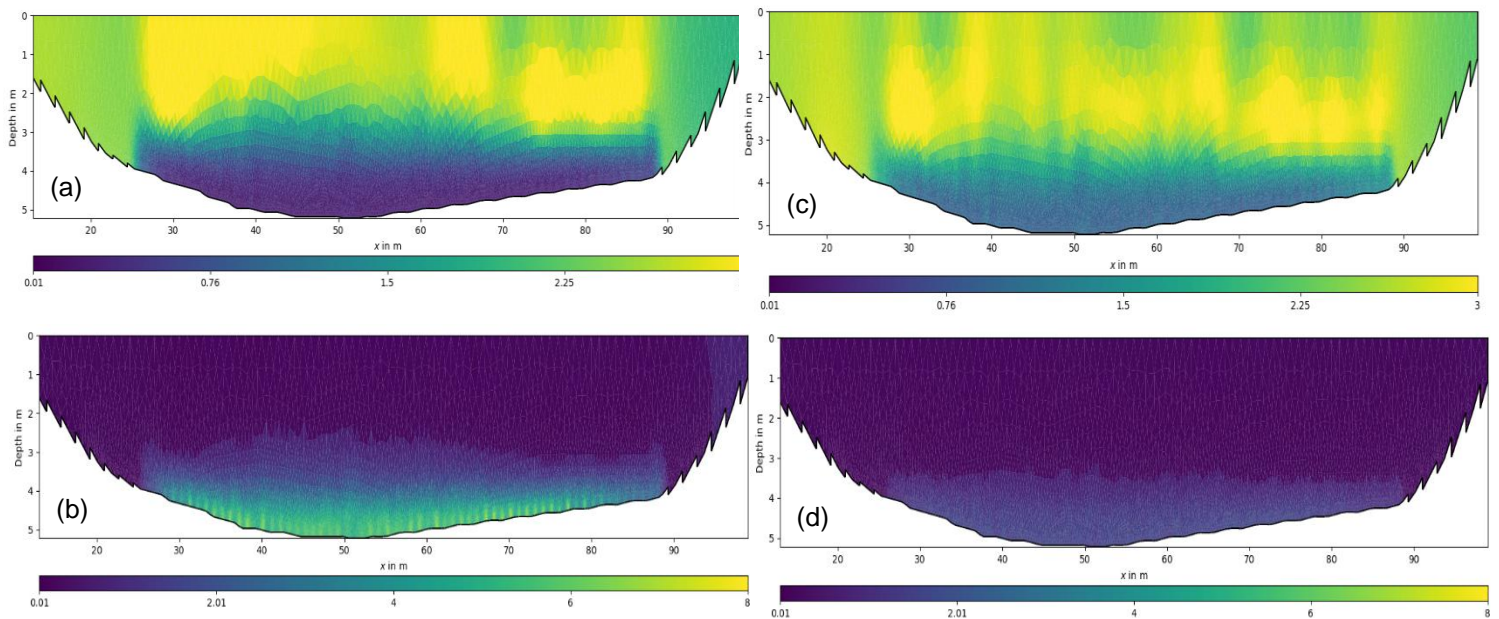
Laag	Weerstand (Ohm-m)	Saliniteit (PSU)
1	2.3	0.62
2	2	0.71
3	1.5	0.95
4	1.0	1.5
5	0.5	2.85
6	0.3	4.76

Tabel 3.2: input waarden zes-lagen model (minder zout)

Laag	Weerstand (Ohm-m)	Saliniteit (PSU)
1	2.3	0.62
2	2	0.71
3	1.8	0.79
4	1.5	0.95
5	1.3	1.0
6	1.0	1.5

De inversie resultaten van een zoutere (Figuur 3.6a en b) en een minder zoute laag (Figuur 3.6c en d) op de bodem laat duidelijk zien dit verschil in contrast vrij makkelijk wordt onderscheiden door de methode. Zoals eerder ook al gezien, is er een duidelijke 'signatuur' van de gekozen inversie mesh die in beide inversies duidelijk en zeer vergelijkbaar terug komt.

De vergelijking met het inversie resultaat omgezet naar saliniteit in Figuur 3.6b en de input in Figuur 3.5b laat het duidelijkst zien dat de zouttong goed wordt onderscheiden door de gesimuleerde metingen en met de verwachte saliniteitswaarden. Echter, de overgang van zoet naar zout is veel minder scherp dan in de 'werkelijkheid'. In Figuur 3.6b is daarnaast ook nog duidelijk het effect zichtbaar van afwijkingen vlakbij de individuele elektroden. Dit zijn geen artefacten van de simulatie, maar een werkelijk effect dat bij veldmetingen terugkomt en waar rekening mee gehouden.



Figuur 3.6: inversieresultaat groter contrast (a) weerstand ohm-m en (b) PSU. En ook de inversieresultaat kleiner contrast (c) weerstand ohm-m en (d) PSU.

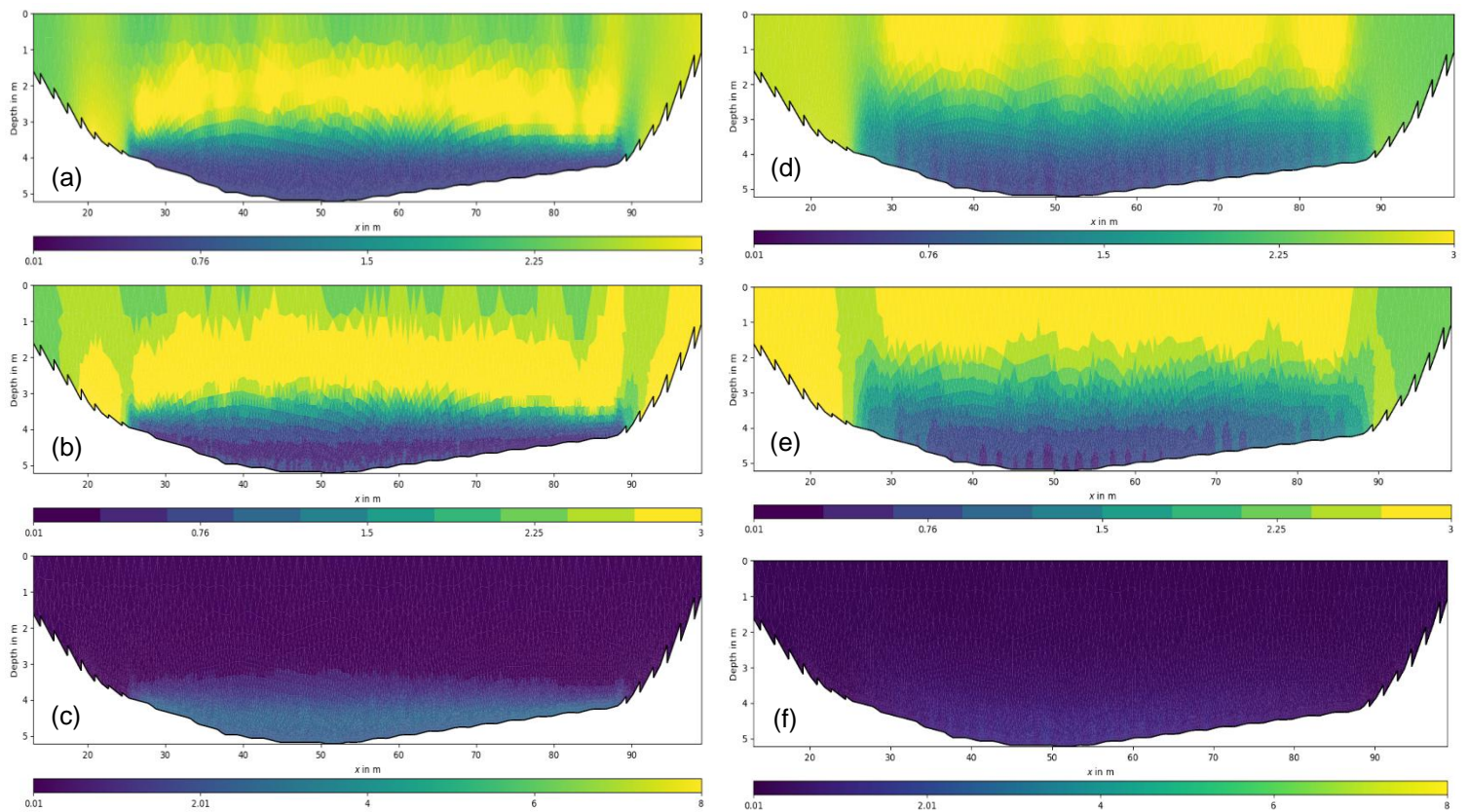
### 3.4 Effect van elektrodenafstand

In de resultaten van de vorige paragrafen is er steeds een ERT kabel gebruikt die over de bodem is neergelegd met 64 elektroden een onderlinge afstand van 1 m. Hier wordt gekeken naar het effect op het inversieresultaat als we dichtheid van de elektroden verdubbelen of halveren. Dat wil zeggen:

- 128 elektrodes met een onderlinge afstand van 0.5 m
- 32 elektrodes met een onderlinge afstand van 2.0 m

Zoals verwacht geeft het inversieresultaat voor een elektrodenafstand van 0.5 m (Figuur 3.7a-c) de overgang van zoet naar zout nog beter weer, namelijk als een vrij scherpe overgang. Voor een elektrodenafstand van 2 m is dit juist andersom (Figuur 3.7d-f). Hier wordt de overgang als veel meer gradueel weergegeven.

De verstoring van de resultaten door de gekozen inversie mesh is hier ook weer terug te zien in de resultaten, maar het grote verschil in scherpheid van het contrast wordt veroorzaakt door het verschil in elektrodenafstand. Doordat de zoet-zout overgang met 0.5 m elektrodenafstand het scherpst gemeten wordt, lijdt deze configuratie ook het meest onder de eerdergenoemde verstoringen van de gebruikte inversie mesh. Het is dan ook de verwachting dat de inversieresultaten bij een beter ontworpen mesh voor korte elektrodenafstanden het meest zullen verbeteren in vergelijking met de inversiemesh gebruikt in deze studie.



*Figuur 3.7: Inversieresultaten voor 0.5 meter elektrodenafstand. Resistiviteit in ohm-m in een (a) continue en (b) discrete kleurschaal en (c) saliniteit in PSU. De overgang van zoet naar zout is scherper zichtbaar dan bij 1.0 meter elektrodenafstand*

*Inversieresultaten met 2.0 m elektrodenafstand. Resistiviteit in ohm-m in een (d) continue en (e) discrete kleurschaal en (f) saliniteit in PSU. De overgang van zoet naar zout lijkt meer gradueel, terwijl dit in werkelijkheid niet zo is.*

### 3.5 Effect lengte en afstand op duur metingen

In de vorige paragraaf keken we naar het effect van het verschil in elektrodenafstand op het inversie resultaat. Omdat we steeds hetzelfde meetbereik gebruiken, houdt dit in dat het aantal elektroden dat we gebruiken steeds verschillend is. Dit heeft los van het resultaat ook effect op de duur van de metingen. Er worden met meer elektroden potentieel meer meetcombinaties gevormd, wat voor een langere meettijd zal zorgen. Uiteraard is het mogelijk om hetzelfde aantal meetcombinaties uit te voeren als bij een meting met minder elektroden om de meettijd in te korten, maar dit zal ten koste gaan van de meetresolutie. Voor veldmetingen moet dus een afweging gemaakt worden. Voor het meten van snelle veranderingen (minuten) de 2 meter afstand een goede overweging kunnen zijn, voor tragere verandering (10 talen minuten) kan worden gekozen voor een 0.5 m elektrodenafstand.

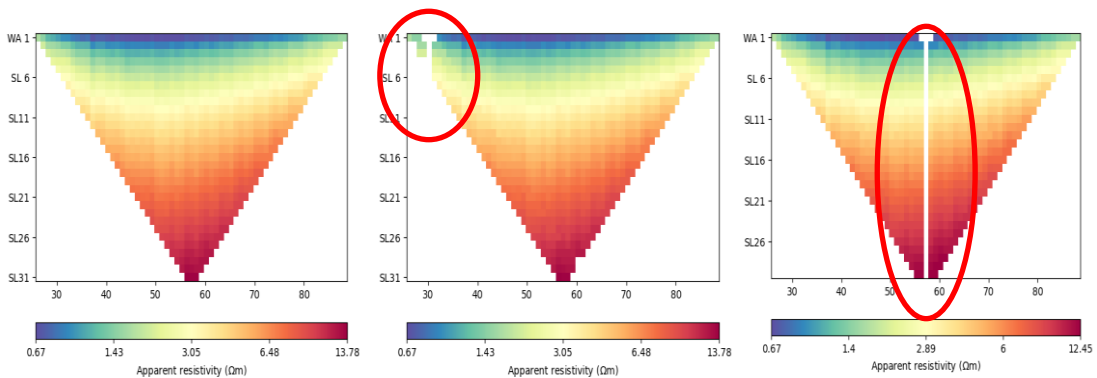
Deze overweging is niet nader onderzocht in deze studie en moet meegenomen worden in de testfase van de veldproef. Het is sterk afhankelijk van de specifieke veldsituatie en kan ook tijdens de meetcampagne nog aangepast worden, door bijvoorbeeld elke tweede elektrode te gebruiken in een ERT kabel met 0.5 m elektrodenafstand.

### 3.6 Effect kapotte elektrode

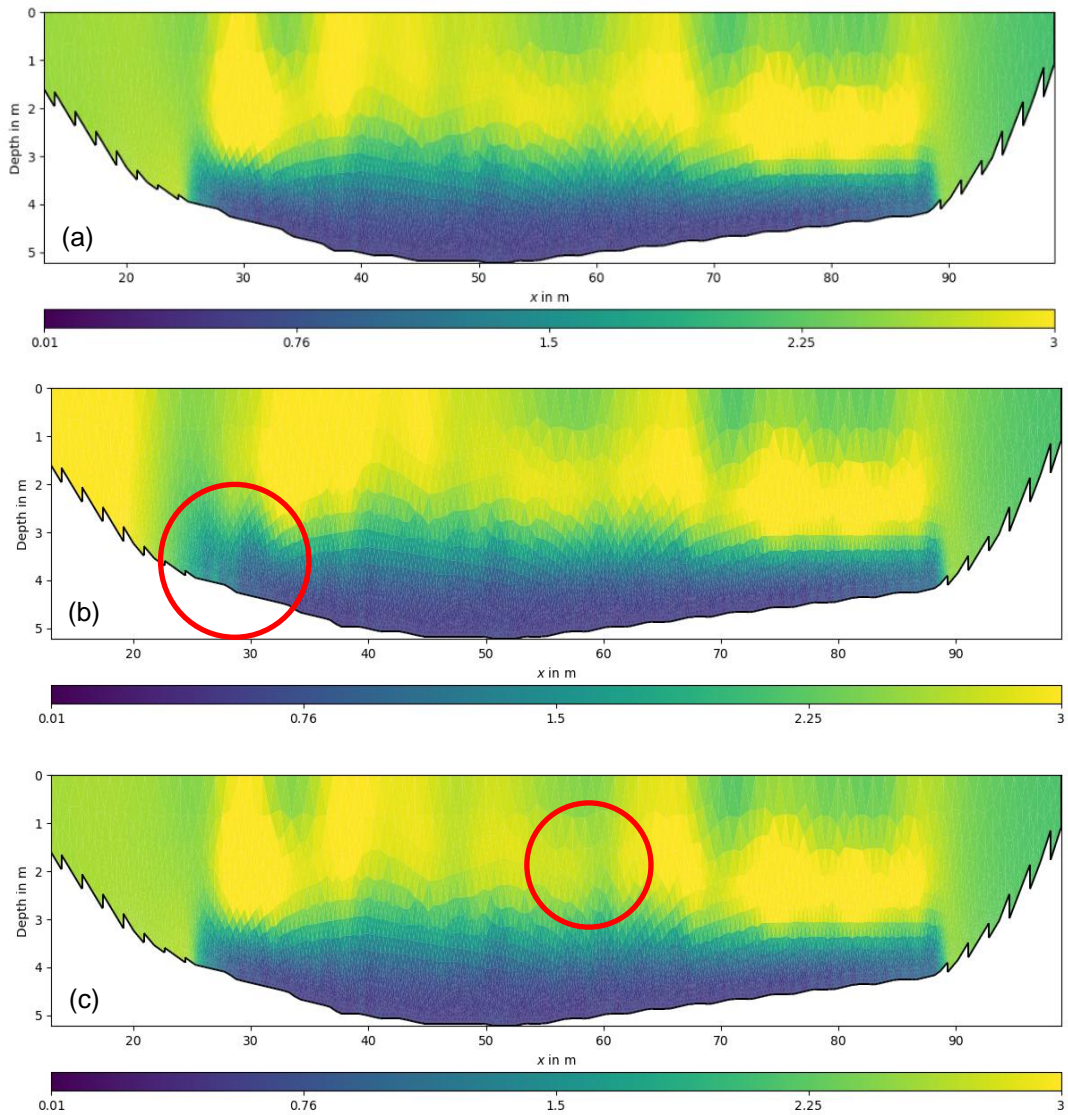
Het kan zijn dat een elektrode niet naar behoren werkt. Om te laten zien dat dit geen grootschalig effect heeft op het inversieresultaat, simuleren wij ook data waarbij 1 elektrode (1 aan de zijkanten van de elektrodenlijn, 1 in het midden van de elektrodenlijn), geen metingen produceert.

Een kapotte elektrode aan de zijkant heeft een effect op de data. In de Figuur 3.8 is een pseudosectie van de gesimuleerde data gegeven van een complete array, een array waarbij de elektrode aan de zijkant (elektrode 5) mist, en een array waarbij een elektrode in het midden van de array mist (elektrode 32).

Waar in de data het effect van de kapotte elektrode in het midden van de array het grootst is, is dat in het inversieresultaat juist andersom. In het inversieresultaat is het effect van de missende elektrode in het midden van de array niet zichtbaar. Dit komt omdat het gebied waar deze elektrode effect op heeft, makkelijker door andere elektroden in de serie kunnen worden opgevangen omdat de elektrode een meetbereik heeft die overlapt met veel elektroden aan beide kanten. Het effect van een kapotte elektrode aan de zijkant heeft een groter effect. Deze elektrode heeft een unieker meetbereik omdat deze aan de rand van de meetarray zit. Hierdoor zie je dat het missen van deze elektrode, wél een (klein) effect heeft op het inversieresultaat. Omdat het aan de pseudosecties van de data goed te zien is hoe een elektrode functioneert ten opzicht van het geheel, kan je deze effecten op een juiste manier interpreteren in de inversiedata gepresenteerd in Figuur 3.9.



*Figuur 3.8: Pseudosecties simulatiedata met (a) alle elektroden werkend, b) elektrode 5 niet werkt en c) elektrode 32 niet werkt.*



*Figuur 3.9: Inversieresultaten voor een Schlumberger array waarbij a) alle elektroden werken, b) elektrode 5 niet werkt en c) elektrode 32 niet werkt. De subtiele verschillen zijn aangeduid met een rode cirkel.*

## 4 Conclusies en aanbevelingen

Dit hoofdstuk geeft de conclusies uit de resultaten van de meetsimulaties en aanbevelingen voor een meetcampagne aan de hand van de gestelde doelen in 1.2.

### 4.1 Meetsimulaties

Elektrische weerstand tomografie (ERT) is een geschikte methode voor het meten van zoutindringing in oppervlaktewater. De volgende conclusies

1. **Precisie van metingen in een constante saliniteit:** Het gebruik van ERT in een waterkolom met constante saliniteit zoals in het homogene model, laat de afwijkingen zien van de inversieresultaten. De waargenomen elektrische weerstand wijkt +/- 0.4 ohm-m af van de verwachte waarde, wat overeenkomt met +/- 0.1 PSU in saliniteit .
2. **Verticaal resolutie:** Zoals verwacht is de ERT methode niet in staat om fijne stratificaties (centimeterschaal) zoals in het zes-lagenmodel te onderscheiden. Het inversieresultaat geeft dit dan weer als een overgang tussen zoet water en de 'zouttong', zonder een scherp gelaagd beeld van de structuren. Als de diepte van de overgang, en de variatie ongeveer bekend is kan dit wellicht verbeterd worden door de inversie hierop te 'focussen'.
3. **Contrasten in saliniteit:** ERT is in staat om duidelijke verschillen in saliniteit te detecteren. Een zouttong met een hogere en een lagere saliniteit kan makkelijk onderscheiden worden van het basis zeslagenmodel en geeft realistische saliniteitswaarden. Wel tonen de resultaten een geleidelijke overgang tussen zoet en zout water in plaats van duidelijke gelaagdheid.
4. **Invloed van elektrodenafstand:** (1) Veranderingen in elektrodenafstand (bijvoorbeeld halvering of verdubbeling) beïnvloeden hoe scherp de zoet-zout overgang wordt weergegeven in de inversieresultaten. Bij een grotere afstand vinden we nog steeds realistische waarden voor de zoete bovenlaag en de zouttong, maar de zoet-zout overgang wordt meer uitgesmeerd over de diepte. Een kortere elektrode afstand geeft deze overgang veel scherper wat dus meer overeenkomt met de werkelijkheid. (2) een kortere elektrodenafstand betekent meer elektroden over hetzelfde meetbereik. Meer elektroden betekent dat 1 meting langer duurt, wat effect heeft op de tijdsresolutie. Het verschil in lengte van de verschillende meetconfiguraties is hier niet onderzocht, omdat het sterk hardware afhankelijk is.
5. **Effect van defecte elektroden:** Het ontbreken van een enkele elektrode heeft een beperkt effect op de inversieresultaten, wat de robuustheid van de metingen aantoont.

Deze conclusies onderstrepen de effectiviteit van ERT voor het in kaart brengen van zoutindringing, terwijl ze ook de beperkingen van de methode benadrukken. De meetsimulaties zijn reproduceerbaar via de, voor deze studie ontwikkelde, SaltSimulator (zie hoofdstuk 5 voor details en links).

## 4.2 Aanbevelingen voor optimalisatie meetopstelling voor Kornwerderzand

Uit de conclusies van de meetresultaten kunnen de volgende aanbevelingen worden gegeven voor de beoogde meetopstelling bij Kornwerderzand. Hoewel in de veldkalibratie alle instellingen goed moeten worden bekeken, geven de volgende aanbevelingen het startpunt.

### **Gebruik een elektrodenafstand van 1 m**

- Het contrast tussen de zoete bovenlaag en de zouttong is groot genoeg om ook met minder elektroden goed in kaart te brengen. De overgangen van zoet naar zout in het zes-lagen model is zo snel dat de ERT methode dit als twee lagen ziet voor alle geteste elektrodenafstanden (0.5, 1 en 2 m). Kortere elektrodenafstanden geven de geven zoet-zout overgang wel scherper weer waar dit voor grotere afstanden meer gradueel wordt.
- Door deze keuze in plaats van 0.5 m elektrodenafstand worden minder elektroden (64) gebruikt over hetzelfde meetbereik. Dit zorgt dat elke metingen minder tijd kost en dat snellere veranderingen in beeld kunnen worden gebracht.

### **Gebruik als meetconfiguratie de Schlumberger array**

De verschillen tussen de geteste meetsimulaties zijn subtiel. Om deze reden zijn, ter referentie, de inversieresultaten van dipole-dipole en de Wenner array alleen opgenomen in bijlage 7.2. Mogelijk blijkt uit de veldkalibratie dat een situatie specifieke array nog een beter resultaat levert. De zoete laag boven de zouttong hoeft ook niet helemaal ingemeten te worden. Hierdoor zijn niet alle meetcombinaties tussen de elektrodes nodig, wat de meettijd aanzienlijk kan verkorten.

### **Gebruik een 'slimme mesh' voor de inversie**

Door voorkennis van de zoutverdeling kan de inversie gestuurd worden en verbeteren hierdoor de resultaten. Als de typische diepte en de variatie hiervan van de overgang tussen zoet en de zouttong bekend is, kan rond deze diepte een heel fijn inversie-mesh worden gebruikt.

Deze aanbevelingen vormen de basis voor het opzetten van meetplan voor zoutindringing bij de Lorentzsluizen van Kornwerderzand, de schutssluisen tussen de Waddenzee en het IJsselmeer aan de noordwestkant van de afsluitdijk.

## 4.3 Haalbaarheid voor input voor D-HYDRO

De haalbaarheid om met de ERT data de inversieresultaten te gebruiken voor het verbeteren van de D-HYDRO modellen, moet nog in meer detail worden onderzocht. Dit is het meest nuttig om uit te voeren door de werkelijke metingen uit de beoogde campagne bij Kornwerderzand naast de 'naïeve' modelresultaten van D-HYDRO te zetten.

Wel kan al uit deze studie worden geconcludeerd dat, hoewel de saliniteitsresolutie vrij goed is, dat de verticale resolutie niet op decimeter schaal is. Er moet dus onderzocht worden, wat de benodigde resolutie is om de modellen te verbeteren. De verandering van de saliniteit in de waterkolom door de tijd heen is hierin ook een belangrijke factor in de vergelijking tussen model en data.

De voortzetting van haalbaarheidsdoel dient daarom weer meegenomen te worden in de vervolgstudies.

## 5 Reproduceerbaarheid

Ten behoeve van het zoutindringingsproject is het SaltSimulator github pakket ontwikkeld voor expert gebruikers. Het pakket is 'open source', dat wil zeggen dat de python code volledig publiek beschikbaar is en open voor contributies. Het pakket steunt sterk op het Pygimli (Rücker et al., 2016).

<https://github.com/Deltares-research/SaltSimulator>

Alle berekeningen uitgevoerd voor de totstandkoming van dit rapport alsmede de productie van alle figuren zijn reproduceerbaar door deze SaltSimulator. Een voorbeeld van de berekening in een dipole-dipole configuratie met 128 elektroden bij een elektrodenafstand van 0.5 m voor de homogene casus en het zes-lagenmodel, is opgenomen in het volgende 'Jupyter Notebook'.

[https://github.com/Deltares-research/SaltSimulator/blob/main/notebooks/Electrical\\_Resistivity\\_Tomography.ipynb](https://github.com/Deltares-research/SaltSimulator/blob/main/notebooks/Electrical_Resistivity_Tomography.ipynb)

De SaltSimulator is door het jaar heen gebruikt als demo tool in de voortgangvergaderingen met Rijkswaterstaat.

## 6 Referenties

Lewis, E.L., Perkin, R.G. (1981), The practical salinity scale 1978: conversion of existing data, Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, Volume 28, Issue 4, Pages 307-328,

Nieboer, R., Karaoulis, M. (2021), Meetplan voor zoutindringing in oppervlaktewater - door middel van innovatieve ERT en iDAS metingen. Deltares report 11206790-003-ZKS-0001

Nieboer, R., Obando Hernandez, E., Leentvaar, E., Pefkos, M., Karaoulis, M. (2023), Innovative survey techniques for measuring salt intrusion in surface waters - Results of Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Acoustic Tomography using Distributed Acoustic Sensing (DAS) measurements. Deltares report 11206790-003-ZKS-0003.

Rücker, C., Günther, T., Wagner, F. (2016), PyGIMLi - An Open Source Python Library for Inversion and Modelling in Geophysics. In 78th EAGE Conference and Exhibition 2016, WS08-Open Source Software in Applied Geosciences. 2016. doi:10.3997/2214-4609.201601651.

Weiler, O., O'Mahoney, T., Burgers, R. (2018), Zoutindringing schut- en spuisluizen - Opzet en verkenning Zeesluisformulering

# 7 Bijlage

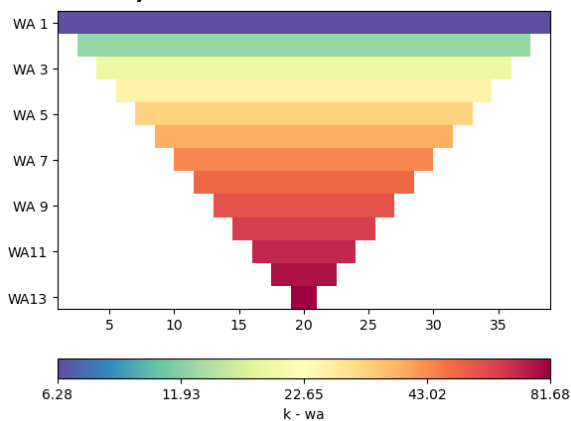
## 7.1 Uitleg meetconfiguraties

De configuratieplot laat zien waar en in welke mate de meetconfiguratie in de diepte meet. Hierbij zijn de elektroden op het oppervlak (bovenkant van de plot) geplaatst en meten volgens het schema. De diepte van de metingen is afhankelijk van de elektrodenafstand, en daardoor in de schematisatie relatief. De kleurwaarde in de plot is de geometrische factor. De geometrische factor beïnvloedt hoe efficiënt de elektrische stroom door de ondergrond stroomt en hoe goed de weerstand kan worden gemeten. Hoe lager de geometrische factor, hoe hoger de nauwkeurigheid, resolutie en efficiëntie van de data op dat punt. De uiteindelijke coverage wordt uiteraard ook bepaald door de parameters van het gemeten medium.

### Wenner Array:

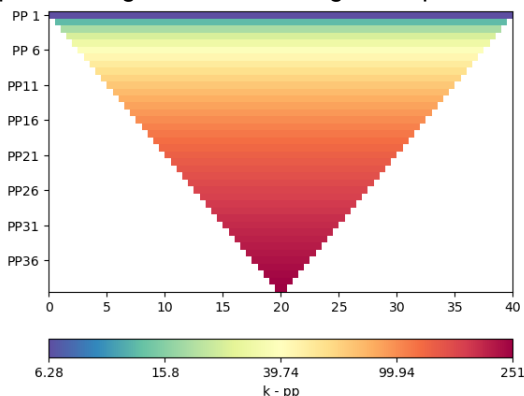
Dit is een veelgebruikte meetconfiguratie waarbij de elektroden gelijkmatig over een lijn zijn verdeeld. Het Wenner-schema is eenvoudig en biedt een goed overzicht van de weerstand over een relatief grote afstand, maar heeft een matige resolutie voor oppervlaktelagen.

De Wenner array is geschikt voor oppervlaktetoepassingen waar het doel is om relatief uniforme structuren te meten. De Wenner metingen heeft het hoogste dieptebereik in het midden van de elektrodenrij.



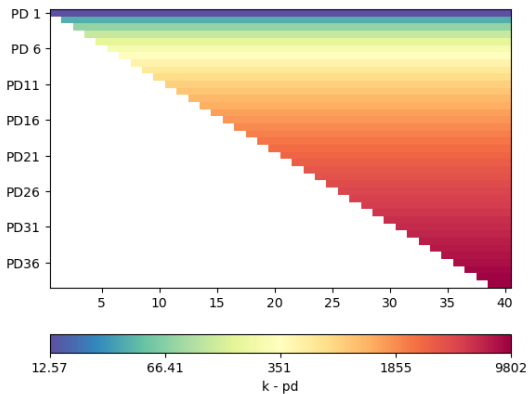
### Pole-Pole Array:

Bij de Pole-Pole-configuratie wordt één elektrode gebruikt voor het injecteren van stroom en de andere voor het meten van de spanning, met de potentiële elektrode op een afstand van de stroomelektrode. Pole-Pole wordt vaak gebruikt voor diepteonderzoeken, omdat het een dieper penetraal bereik heeft, maar het kan een lagere resolutie hebben voor oppervlaktelagen. De pole-pole metingen heeft het hoogste dieptebereik in het midden van de elektrodenrij.



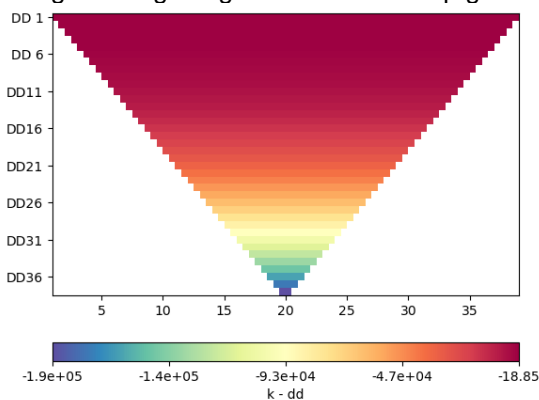
### Pole-Dipole Array:

Dit schema combineert de Pole-Pole-configuratie met een dipoolconfiguratie voor de potentiële elektroden. Het biedt een grotere dieptegevoeligheid dan de traditionele dipole-configuratie, maar met betere resolutie voor het oppervlak dan de Pole-Pole. Deze configuratie is geschikt voor een gebalanceerde benadering van zowel oppervlakte- als dieptemetingen. Deze meetopstelling meet dieper aan 1 kant van de meetopstelling, door deze meetopstelling te spiegelen krijg je een volledig beeld van de gehele ondergrond onder de opstelling.



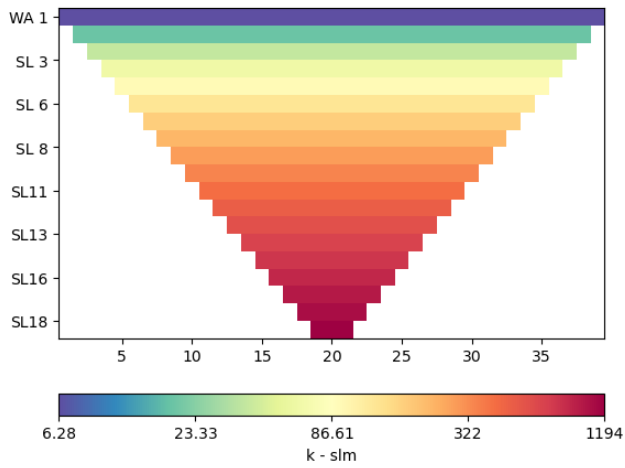
### Dipole-Dipole Array:

Bij de Dipole-Dipole-configuratie worden zowel de stroom- als de potentiële elektroden in een dipoolconfiguratie geplaatst, wat resulteert in zeer gedetailleerde metingen over een bepaald gebied. Dit schema is bijzonder geschikt voor metingen op grotere diepten en is vaak gebruikt bij het in kaart brengen van geologische structuren op grotere diepten.



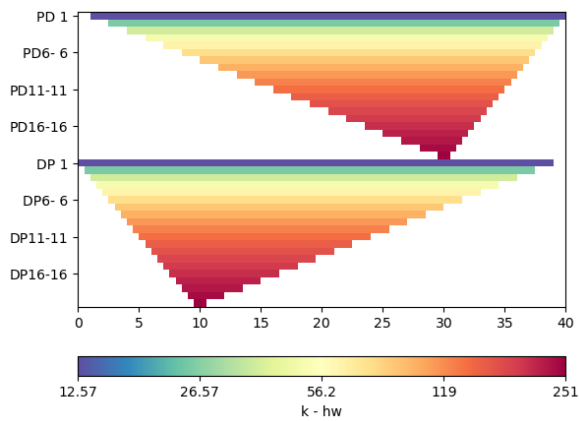
### Schlumberger Array:

Het Schlumberger-schema maakt gebruik van elektroden die variabel van afstand zijn, wat resulteert in een grotere gevoeligheid voor dieper liggende structuren. Het heeft een goede balans tussen diepte- en resolutiegevoeligheid, en wordt veel gebruikt in geofysisch onderzoek. Dit wordt gebruikt voor situaties waarbij het belangrijk is om zowel het oppervlak als de diepere lagen in kaart te brengen.



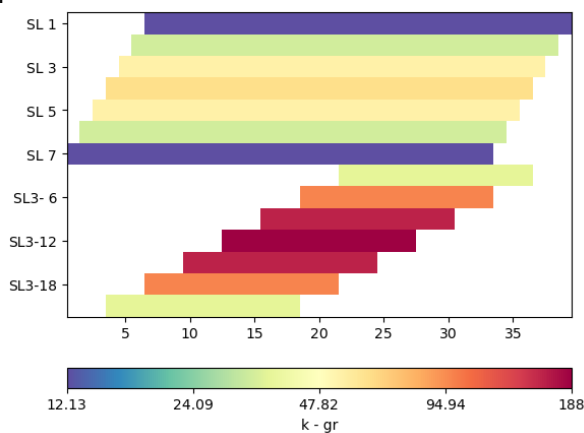
### Herschel-Williams Array:

Het Herschel-Williams-schema is een specifieke configuratie die soms wordt gebruikt voor het in kaart brengen van geologische heterogeniteiten en zorgt voor een balans tussen dieptegevoeligheid en resolutie.



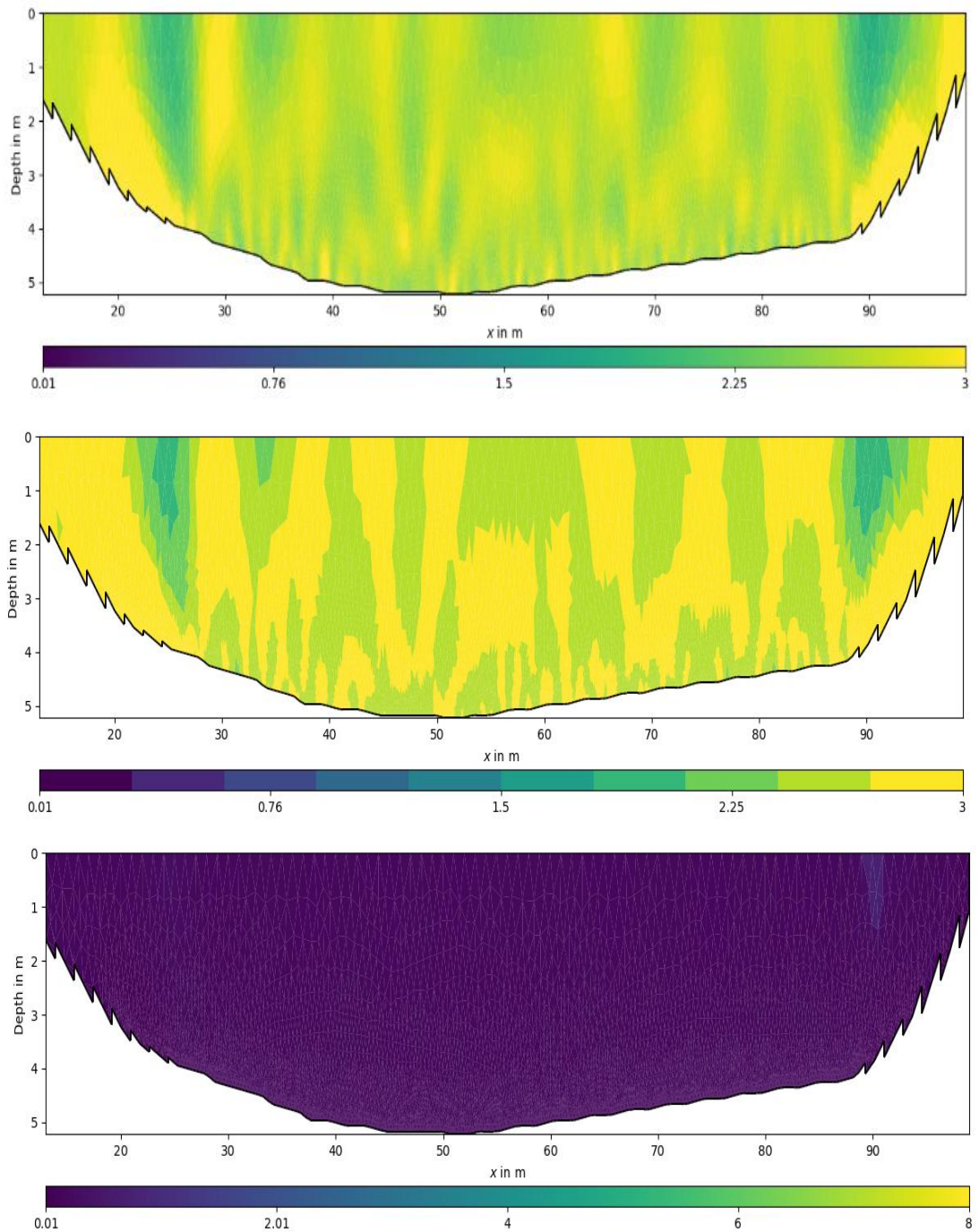
### Gradient Array:

Het Gradient-schema maakt gebruik van een variabele elektrodeafstand om de gevoeligheid voor verschillende dieptes en structuren in de ondergrond te maximaliseren. Het heeft een bredere dekking dan sommige andere configuraties. Dit wordt vaak gebruikt wanneer men geïnteresseerd is in de variaties in de elektrische eigenschappen over een groter gebied en niet alleen op specifieke punten.



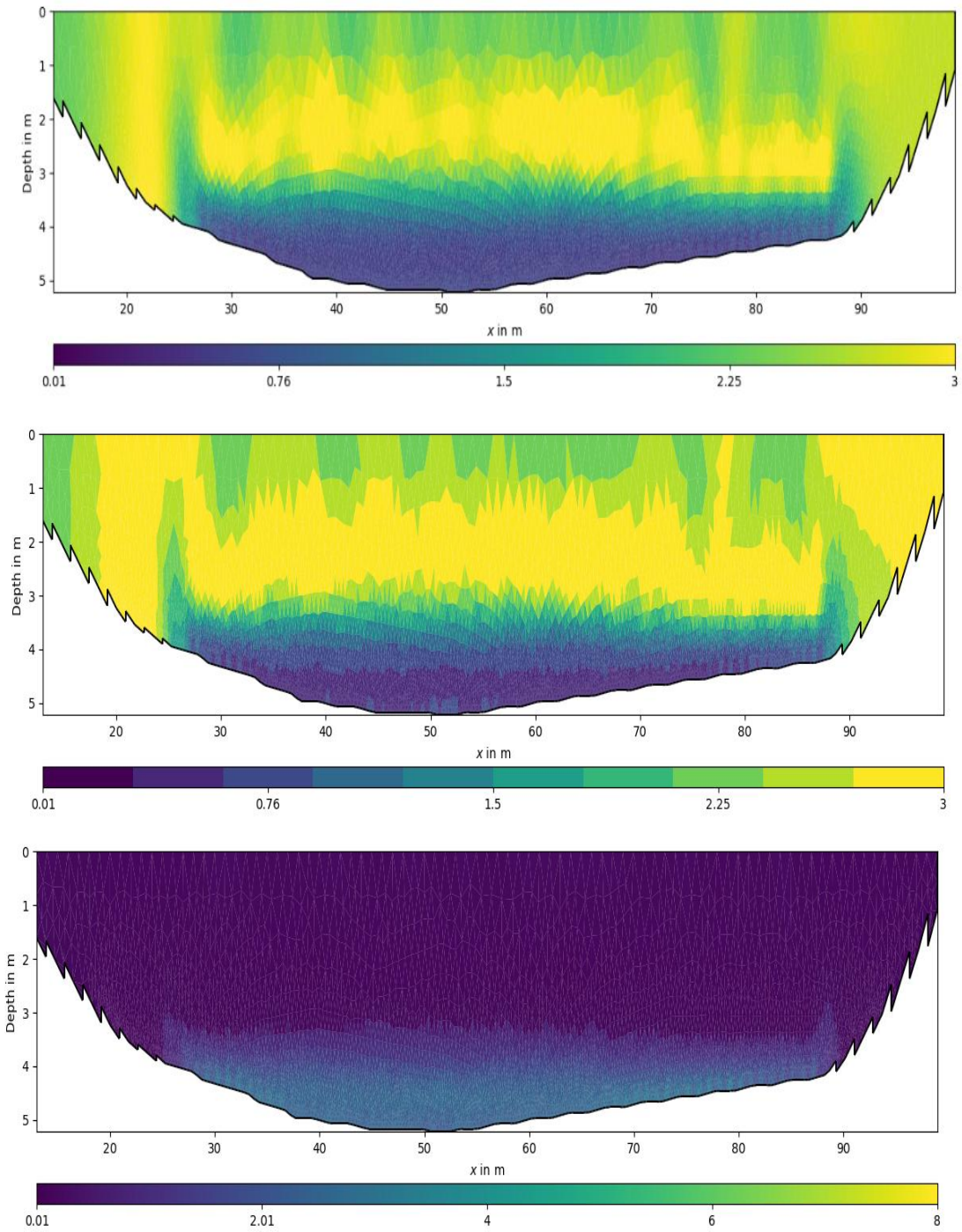
## 7.2 Resultaten andere meetconfiguraties

### Dipole-Dipole configuratie – homogene case



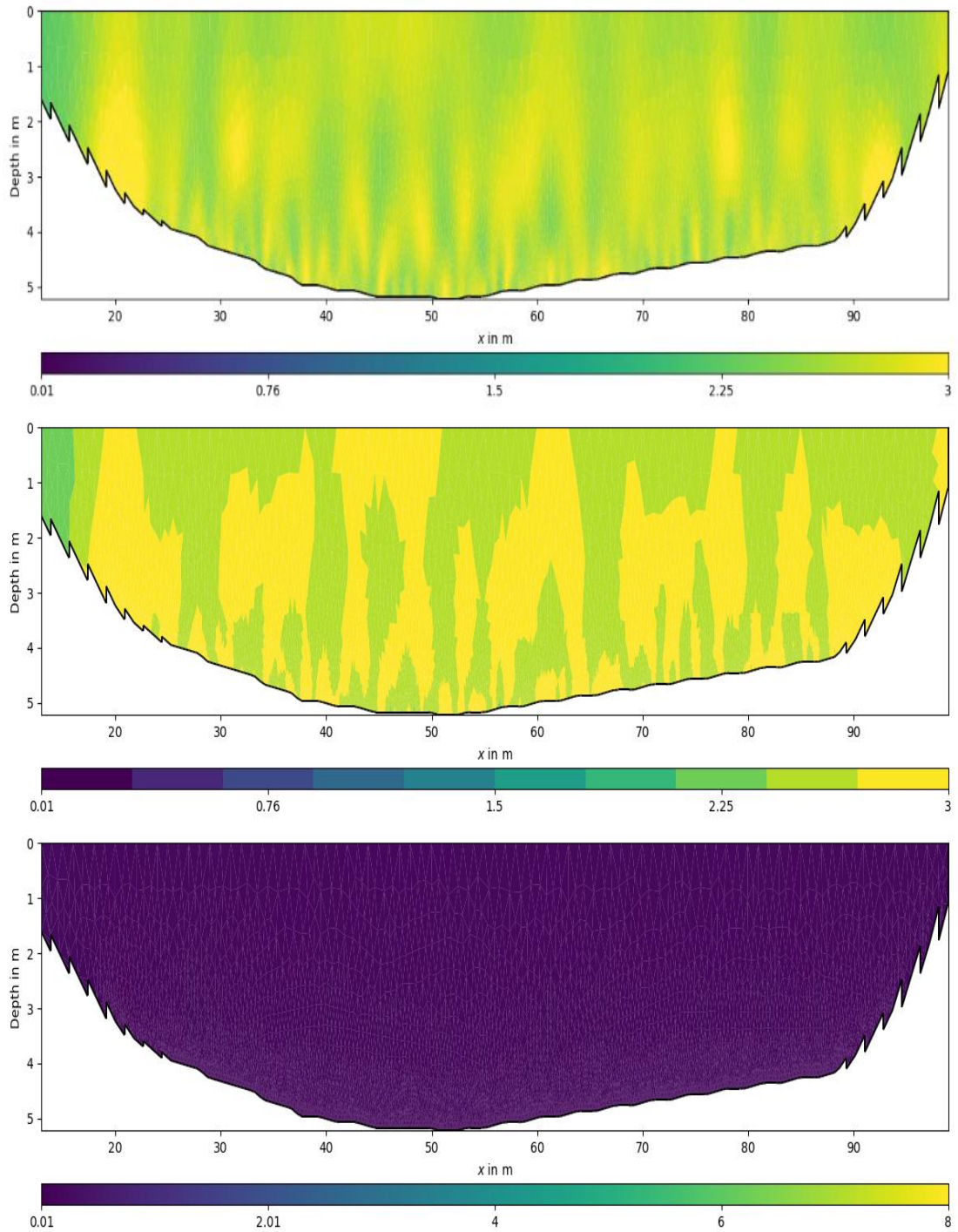
Figuur 7.1: Dipole-Dipole inversiereultaat voor de homogene case

### Dipole-Dipole configuratie - zes-lagenmodel



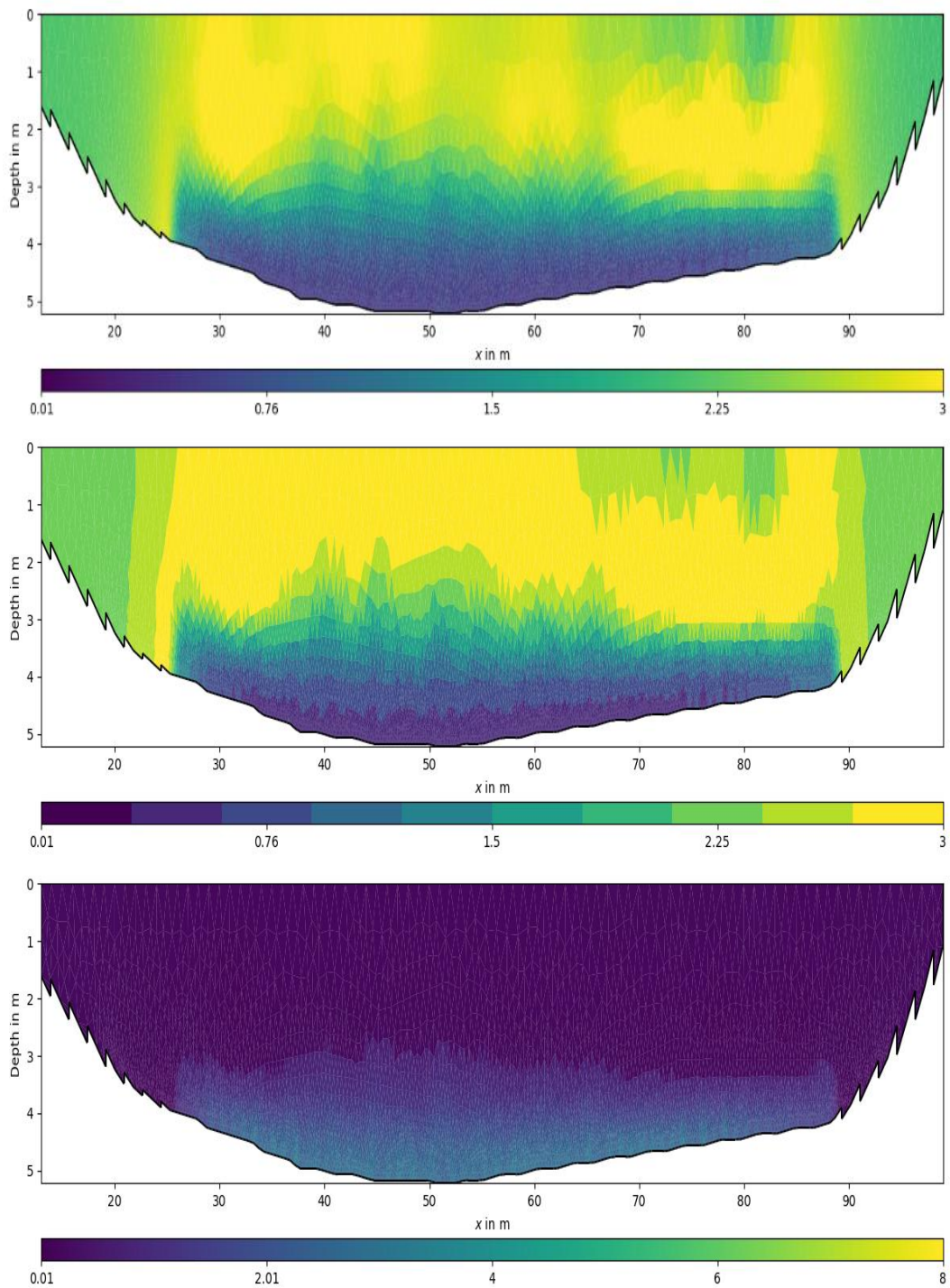
Figuur 7.2: Dipole-Dipole: inversieresultaat voor het zes-lagenmodel

### Wenner configuratie – homogene case



Figuur 7.3: Wenner: inversieresultaat voor homogene case

### Wenner configuratie – zes-lagenmodel



*Figuur 7.4: Wenner: inversieresultaat voor het zes-lagenmodel*

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)