



# Effectberekeningen verzilting tracé Eemshaven

Programma Aansluiting Wind op Zee - Eemshaven

# Effectberekeningen verzilting tracé Eemshaven

Programma Aansluiting Wind op Zee - Eemshaven

## Colofon

### Klant

TenneT

### Status

Eindrapport

### Datum

12 juli 2024

### Projectnummer

AW24\_093\_AG\_211175

### Auteur(s)

Gevaert A., Siebinga M., Sandfort N.

### Gecontroleerd door

Dr. M. J. Waterloo

### Vrijgegeven door

Arjen de Vries

## Disclaimer

Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via [info@acaciawater.com](mailto:info@acaciawater.com)

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Gebiedsbeschrijving</b>	<b>3</b>
	2.1 Bodem	3
	2.2 Grondwater	4
	2.3 Zoet-zout situatie	6
	2.4 Aanleg tracé	10
	2.5 Autonome ontwikkelingen	12
<b>3</b>	<b>Aanpak</b>	<b>15</b>
	3.1 Standaardprofielen	15
	3.2 Modellerings	18
	3.3 Verificatie modelresultaten	21
<b>4</b>	<b>Huidige situatie</b>	<b>22</b>
	4.1 Gevoeligheidsanalyse	22
	4.2 Standaardprofielen	23
	4.3 Verificatie modelresultaten	24
<b>5</b>	<b>Effecten door aanleg tracé</b>	<b>27</b>
	5.1 Effecten tijdens en direct na aanleg	27
	5.2 Herstelperiode	30
<b>6</b>	<b>Mitigerende maatregelen</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Conclusie</b>	<b>34</b>
	7.1 Berekende verziltingsrisico	34
	7.2 Autonome ontwikkelingen	36
	7.3 Mitigerende maatregelen	36
	7.4 Relevantie onderzoek en hoe verder	37

<b>8 Referenties</b>	<b>38</b>
<b>Bijlage 1 – Vergelijking kwelkaarten</b>	<b>39</b>
<b>Bijlage 2 – DUALEM rapportage</b>	<b>43</b>
<b>Bijlage 3 – Clustering</b>	<b>44</b>
<b>Bijlage 4 – Vergelijking kwel clusters</b>	<b>45</b>
<b>Bijlage 5 – Drainage enquête</b>	<b>49</b>

# 1 Inleiding

TenneT is in de voorbereidende fase voor het Programma Aanlanding Wind op Zee (PAWOZ). PAWOZ-Eemshaven onderzoekt de mogelijkheden voor toekomstige kabelroutes om energie van windenergiegebieden in de Noordzee naar de Eemshaven te brengen. Eén van de beoogde kabelroutes loopt door de Waddenzee en vanaf de aanlanding over land, parallel aan de Waddenzee. Een mogelijke route wordt in Figuur 1 getoond. Het tracé doorkruist daarbij hoogwaardige landbouwgronden (veelal akkerbouw) in het noorden van Groningen.

Door de ontstaansgeschiedenis en ligging van dit gebied, betreft het een regio waar sprake kan zijn van verzilting. Dit kan zijn in de huidige situatie, of in toenemende mate op termijn als gevolg van bodemdaling (door klimaatverandering en grondgebruik) en/of zeespiegelstijging en veranderingen in neerslag en verdamping als gevolg van klimaatverandering (zie o.a. [www.spaarwater.com](http://www.spaarwater.com)). Met de aanleg van het tracé worden er mogelijk zoetwatersystemen doorkruist die bestaan uit zoetwaterlenzen. Een zoetwaterlens is een dunne zoetwatervoorraad die bovenop het zoute grondwater ligt, vaak met een dikte van enkele meters tot minder dan 1 meter. Landbouw in het gebied is mogelijk vanwege deze zoetwaterlenzen, en deze zijn van groot belang voor de agrariërs omdat het zorgt voor zekerheid van zoetwater in de wortelzone.

Doordat de aanleg van de kabels invloed kan hebben op de lokale omgeving, waaronder op verzilting, wordt er voor PAWOZ-Eemshaven een milieueffectrapportage (MER) en integrale effectenanalyse (IEA) opgesteld. Effecten van de aanleg op verzilting zijn hier onderdeel van.



Figuur 1. Eén van de mogelijke kabel routes.

Het doel van deze studie is om te onderzoeken hoe verzilting wordt beïnvloed door ingrepen, zoals open ontgravingen en bemalingen tijdens de installatie van de kabelverbinding. De onderzoeksvragen die daaronder vallen zijn de volgende:

- Was is de grootte van de zoetwatervoorraad in de huidige situatie?
- Wat is het effect van de werkzaamheden op de zoetwatervoorraad direct na afloop van de werkzaamheden (korte termijn effecten)?
- Wat is het effect op de zoetwatervoorraad na 1 en na 5 jaar (lange termijn effecten)?

- Wat is het risico op cumulatieve effecten van autonome ontwikkelingen (klimaatverandering en grondgebruik) en die van de aanleg van het tracé op de zoetwatervoorraad?

In de uitvoering van het project zijn naast initiatiefnemer TenneT ook LTO Noord en de werkgroep Landbouw PAWOZ betrokken. Voor het onderzoek zijn gebied-specifieke gegevens over de bodem en kwelsituatie verzameld uit openbare databases. Waar nodig, zijn extra gegevens verzameld door het uitvoeren van veldonderzoeken. De mogelijke effecten langs de beoogde kabelroute zijn vervolgens vastgesteld aan de hand van meerdere modelberekeningen. Dit rapport zal de gebruikte methode en de resultaten van de effectberekeningen toelichten.

## 2 Gebiedsbeschrijving

De mogelijke route van het tracé doorkruist verschillende polders in het beheersgebied van waterschap Noorderzijlvest. Het landgebruik is overwegend akkerbouw met als belangrijkste gewas poot aardappelen, naast suikerbieten en graan. Door de historische inpoldering en de ligging van het studiegebied, vormt verzilting een risico.

In dit hoofdstuk worden gebiedseigenschappen die belangrijk zijn voor het bepalen van verziltingsrisico, gepresenteerd. Dit zijn bodem, grondwater, kwel, zoet-zout situatie, en de werkwijze bij aanleg van het tracé. Als eerste stap in het onderzoek zijn beschikbare gegevens opgehaald, waaronder bodemopbouw en kwel. Na het verzamelen en analyseren van de beschikbare data, zijn er verschillende 'gaten' in de data geïventariseerd. Vervolgens zijn aanvullende metingen uitgevoerd om deze 'gaten' in de beschikbare data te dichten, alsook om inzicht te verschaffen in de waarden en variabiliteit (bandbreedtes) van belangrijke parameters die van invloed kunnen zijn op het verziltingsrisico. Om deze gegevens te verzamelen zijn begin 2023 op verschillende locaties langs het tracé veldonderzoeken uitgevoerd door Antea Group en Acacia Water.

### 2.1 Bodem

De bodems in het studiegebied zijn kalkrijke poldervaaggronden (Kuijjer, et al., 1987). Voor zoetwaterlenzen is de bodemopbouw tussen ongeveer 1 en 5 m-mv het belangrijkste omdat dit de zone is waarin de meeste zoetwaterlenzen zich bevinden. De bodemopbouw op deze dieptes is gebaseerd op GeoTop (v1.4). Voor 430 punten, gelijkmatig verdeeld over de percelen langs het tracé, is de bodemopbouw opgehaald. Hieruit is gebleken dat de bodems in het gebied voornamelijk zijn opgebouwd uit zavel en/of zand. Hier en daar zijn profielen met dunne kleilagen te vinden. De gelaagdheid van de bodem varieert, maar ongeveer 40% van de bodems bestaan uit zavel op zand. Circa 10% zijn homogene zavel profielen.

Op 26 locaties langs het tracé zijn veldonderzoeken uitgevoerd. Bodemprofielen zijn opgesteld. Daaruit blijkt dat de bodemopbouw langs het tracé voornamelijk opgebouwd is uit zand en zavel, wat overeenkomt met de resultaten van GeoTOP. Op ieder van de 26 locaties zijn ook bodemmonsters genomen op dieptes van ongeveer 2,5 en 5,5 m-mv. Voor ieder bodemmonster zijn de porositeit en doorlatendheid bepaald en is een korrelanalyse uitgevoerd. De doorlatendheid kan ook bepaald worden aan de hand van de korrelanalyse door middel van de zeefkromme methode (Shepherd 1989). In Tabel 1 wordt een samenvatting van de resultaten van deze onderzoeken gepresenteerd.

Tabel 1. Overzicht van mediaan van bodemeigenschappen op basis van veldonderzoeken, met de minimum en maximum tussen haakjes

	Doorlatendheid [m/d]	Doorlatendheid zeefkromme methode [m/d]	Porositeit [-]
<b>Zand</b>	7,7 (0,5–19,0)	5,2 (4,0 – 5,9)	0,48 (0,43–0,58)
<b>Zavel</b>	1,4 (0,1–12,3)	3,9 (2,8 – 4,5)	0,49 (0,41–0,58)

## 2.2 Grondwater

In totaal zijn er langs het tracé 52 peilbuizen geplaatst, waarvan 26 ondiepe en 26 diepe peilbuizen. De diepte van de peilbuizen is respectievelijk ongeveer 2 en 5 m onder maaiveld voor de ondiepe en diepe peilbuizen. Al deze peilbuizen zijn voorzien van grondwaterdivers om op deze manier de stijghoogte verschillen te meten om zo een inschatting te kunnen maken van de kweldruk. Waar de diepere peilbuis zich niet onder de deklaag bevond, was het helaas onmogelijk om een inschatting te maken van de kwelflux.

Bij de plaatsing van de peilbuizen zijn daarnaast beschrijvingen gemaakt van de boorprofielen, dit ter validatie van de gebruikte GeoTop data. Op zes locaties zijn de ondiepe peilbuizen voorzien van een CTD sensor in plaats van een grondwater diver. Deze CTD-sensor meet naast de grondwaterstand ook het zoutgehalte (EC) van het grondwater. Bij de overige peilbuizen is de EC handmatig gemeten tijdens de controlerondes (4x per jaar). Ook is het grondwater bemonsterd op de concentratie chloride. Alle resultaten van de uitgevoerde veldonderzoeken zijn terug te vinden in het rapport van Antea Group (2023).

### 2.2.1 Grondwaterstanden

De peilbuizen zijn voornamelijk geplaatst om inzicht te krijgen in de kwelsituatie. De gegevens geven echter ook inzicht in grondwaterstanden in het projectgebied. Tabel 2 geeft een overzicht van gemeten grondwaterstanden samengevat per vigerend peilgebied. Ten tijde van de analyse waren meetreeksen beschikbaar voor de periode half april 2023 t/m half maart 2024.

Tabel 2. Laagste, mediaan, en hoogst gemeten grondwaterstanden per vigerend peilgebied waarin peilbuizen zijn geplaatst, alsook eigenschappen van die peilgebieden (ZP = zomerpeil, WP = winterpeil). Waar meer dan één peilbuis binnen een peilgebied voorkomt worden de medianen van de statistieken gepresenteerd

Peil-gebied	ZP [mNAP]	WP [mNAP]	Aantal	Grondwaterstand [m NAP]			Grondwaterstand [m-mv]		
				Min	Mediaan	Max	Min	Mediaan	Max
GPG710	-0,20	-0,8	2	-0,49	0,02	0,77	0,58	1,33	1,84
GPG141	-0,24	-0,44	9	-0,10	0,27	0,99	0,26	1,22	1,54
GPG708	-0,30	-0,8	1	-0,39	0,11	0,90	0,49	1,29	1,79
GPG49	-0,35	-0,93	4	-0,48	-0,10	0,65	0,28	1,07	1,43
GPG19	-0,49	-0,69	3	-0,56	-0,13	0,51	0,28	1,04	1,55
GPG440	-0,69	-0,69	4	-0,53	-0,11	0,52	0,50	1,21	1,66
GPG181	-0,73	-0,93	1	-0,40	0,26	1,55	0,09	1,38	2,03
GPG1	-0,93	-0,93	2	-0,31	0,09	1,18	0,30	1,39	1,80

Uit Tabel 2 blijkt dat de hoogste grondwaterstanden in de meetperiode op een enkele uitzondering na ongeveer 0,3 tot 0,6 m-mv waren. Bij de enkele peilbuis in GPG181 is een waarde van 0,09 m-mv bereikt, de 95<sup>e</sup> percentiel was daar 0,55 m-mv. In de droge zomermaanden zakte het grondwater uit van 1,4 tot 2,0 m-mv. De variatie binnen het jaar was voor de meeste peilbuizen tussen 0,9 en 1,7 m, met een mediaan van 1,2 m.



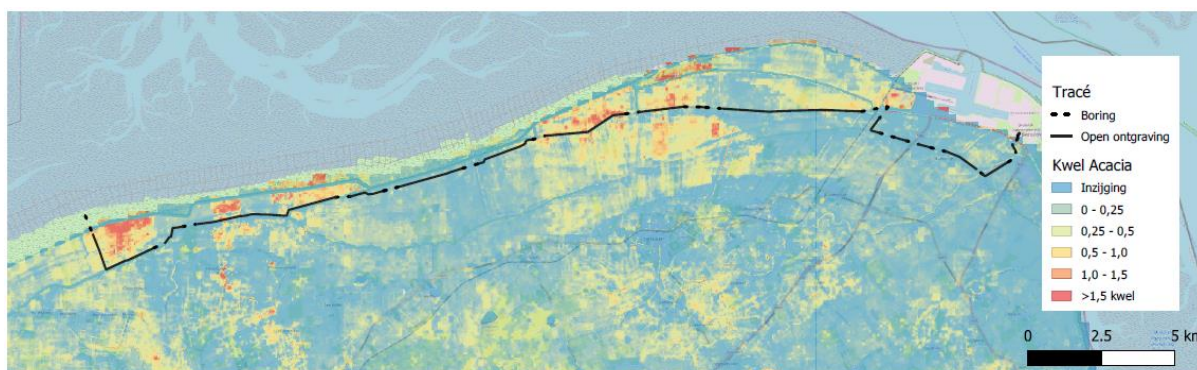
In Tabel 2 worden ook grondwaterstanden ten opzichte van NAP samengevat. Daaruit blijkt dat over het algemeen mediaan grondwaterstanden hoger zijn in peilgebieden waar gehanteerde peilen relatief hoog zijn. GPG141 heeft bijvoorbeeld een relatief hoog zomerpeil en het hoogste winterpeil, en heeft ook de hoogste mediaan grondwaterstanden, alsook de hoogste grondwaterstanden in de droge periode. Voor peilgebieden GPG1 en GPG181 vallen de mediaan en laagste grondwaterstanden hoger uit dan verwacht op basis van het lage zomer- en winterpeil. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de peilbuizen relatief dicht bij de grens van aanliggende peilgebieden liggen waar hogere peilen gehanteerd worden, bijvoorbeeld GPG49 en GPG708.

## 2.2.2 Kwelsituatie

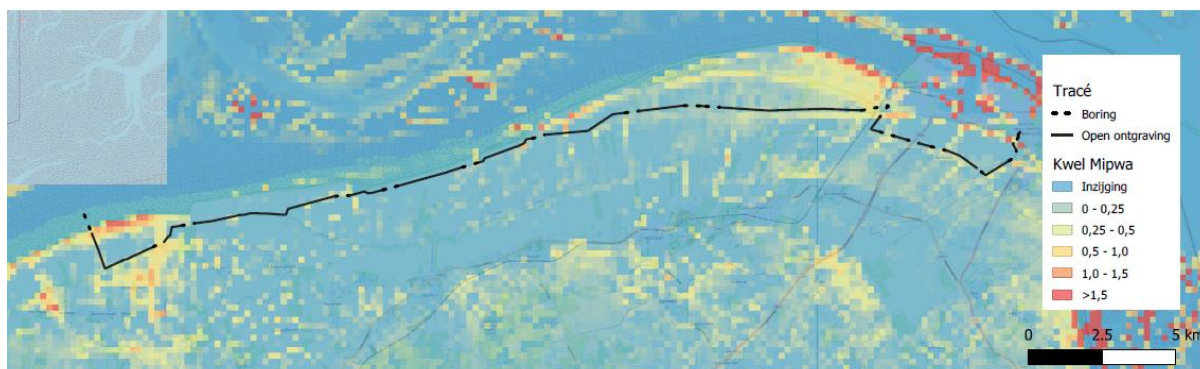
In dit onderzoek zijn verschillende bronnen van kwel meegenomen. Deze bronnen bestaan uit de volgende kwelkaarten:

- 1) de kwelkaart geproduceerd door het Methodiek Interactieve Planning Waterbeheer (MIPWA) model;
- 2) de kwelkaart geproduceerd door het Landelijk Hydrologisch Model (LHM);
- 3) de Acacia Water kwelkaart, een in 2018 intern ontwikkelde kaart.

De kwelkaarten op de locatie van het tracé worden getoond in Figuur 2, Figuur 3, en Figuur 4. Te zien is dat de kaarten onderling verschillen, zowel in waarden als in resolutie. De LHM kwelkaart geeft op het oog de lagere kwelfluxen weer, de Acacia Water kaart hogere. De MIPWA kaart lijkt op het oog hier tussen in te zitten.



Figuur 2. Kwelkaart Acacia Water.



Figuur 3. Kwelkaart Mipwa.



Figuur 4. Kwelkaart LHM.

Er zijn onzekerheden in deze beschikbare kwelkaarten en het is onduidelijk welke van deze drie kwelkaarten het best overeenkomt met de werkelijke situatie. Omdat kwel een belangrijke variabele is in verschillende verziltingsonderzoeken, zoals deze, is het van belang meer grip te krijgen op de betrouwbaarheid van deze kwelkaarten. Daarom is er een vergelijking tussen deze kwelkaarten en meetgegevens gedaan. Tussen peilbuisgegevens waaruit kwelfluxen zijn berekend en DUALEM gegevens van geofysische metingen (Sectie 2.3 en Bijlage 2) waaruit het zoet-zout grensvlak kan worden afgeleid. Zie Bijlage 4 – Vergelijking kwelkaarten voor de gehele analyse. Ook zijn de kwelkaarten en de verschillende veldmetingen onderling vergeleken.

Uit de vergelijkingen blijkt dat:

- De resultaten van de DUALEM geofysische metingen en peilbuismetingen niet goed met elkaar overeenkomen. Dit komt onder andere doordat het bepalen van doorlatendheden en bodemstructuren, welke nodig zijn om de flux te berekenen, een onzekerheid met zich mee brengt. De indicatie voor de kwelflux van de DUALEM metingen worden betrouwbaarder geacht, maar hierbij moet ook gerealiseerd worden dat het vertalen van DUALEM figuren naar kwel klassen ook subjectiviteit met zich mee brengt.
- De resultaten van de DUALEM metingen en peilbuismetingen komen ook matig/niet overeen met de kwelfluxen van de kwelkaarten.
- MIPWA en LHM geven overwegend aan dat de kwelflux, laag tot neutraal is. De Acacia Water kwelkaart uit 2018 geeft voor een aantal locaties wel een hogere kwel. De DUALEM metingen geven voor ongeveer een derde van de locaties (zeven stuks) een hoge kweldruk aan. Dit wordt niet bevestigd door één van de kwelkaarten. De kwelkaart 2018 geeft wel voor een negental locaties een hoge kweldruk, maar deze komen niet goed overeen met de locaties van de DUALEM metingen.

Uit de vergelijking blijkt dat alle drie de kwelkaarten niet goed overeenkomen met de meetgegevens. Naast de redenen die hierboven worden gegeven, komt dit waarschijnlijk ook omdat de metingen een puntmeting betreffen op perceelniveau. Ook wordt de kwelflux bepaald door de diepte van het maaiveld, drain diepte en polderpeil. Het is mogelijk dat deze op perceel schaal in de regionale data net niet goed is opgenomen. Misschien zit er te veel lokale variabiliteit in de kwelflux (die uit de metingen blijkt) om dit goed weer te kunnen geven met één van de drie kwelkaarten.

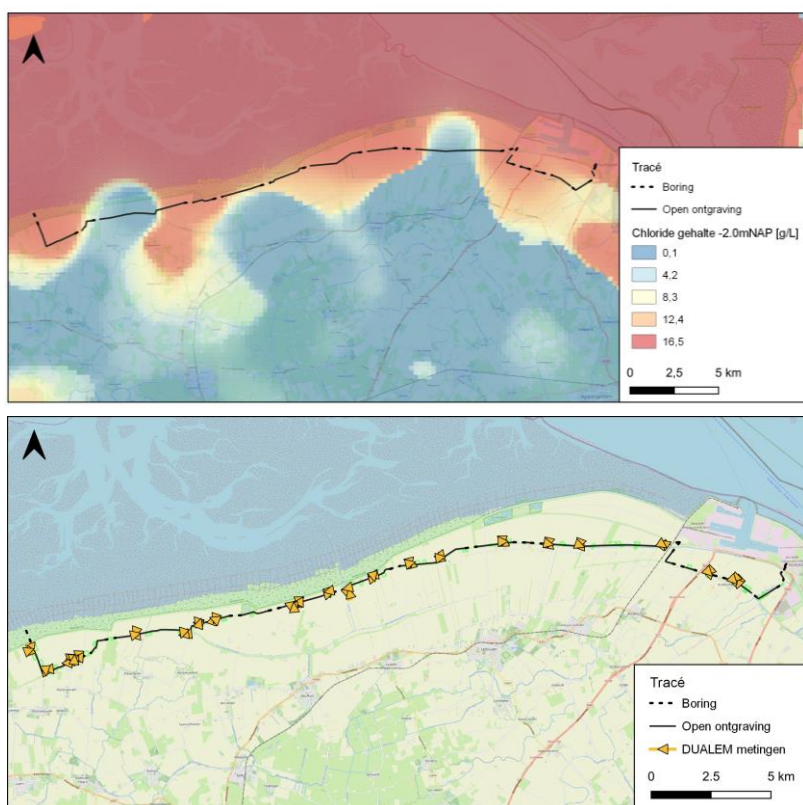
## 2.3 Zoet-zout situatie

Voor het opzetten van de databank, is informatie over de diepteligging van het zoet-zout grensvlak in eerste instantie opgehaald uit het Nederlands Hydrologisch

Instrumentarium (NHI). Binnen het NHI is een landsdekkend zoet-zout grondwatermodel (LHM zoet-zout) ontwikkeld, waarbij de driedimensionaal ruimtelijke (3D) verdeling van chlorideconcentratie in het grondwater in kaart is gebracht (Figuur 7, boven). De 3D verdeling van chloride in het grondwater is afgeleid door een interpolatie van beschikbare metingen.

Vanwege beperkte metingen van zoetwaterlenzen in kwelgebieden, zoals het Fries-Groningse kustgebied, ontbreken in deze dataset echter de ondiepe regenwaterlenzen die ontstaan boven brak grondwater (Delsman, et al., 2020). Gezien het feit dat verziltingsonderzoek zich juist richt op de effecten op deze zoetwaterlenzen, zou het gebruiken van deze dataset een grote onzekerheid met zich mee brengen.

Om een gedetailleerder beeld te verkrijgen, is daarom aanvullend geofysisch onderzoek uitgevoerd door Acacia Water. Voor dit onderzoek zijn 70 DUALEM metingen en twee CVES metingen uitgevoerd, waarbij de weerstand van de bodem is gemeten ter indicatie van de zoet-zout situatie. Een uitgebreidere beschrijving van de geofysische meetmethoden is te vinden in Bijlage 2 – DUALEM rapportage.

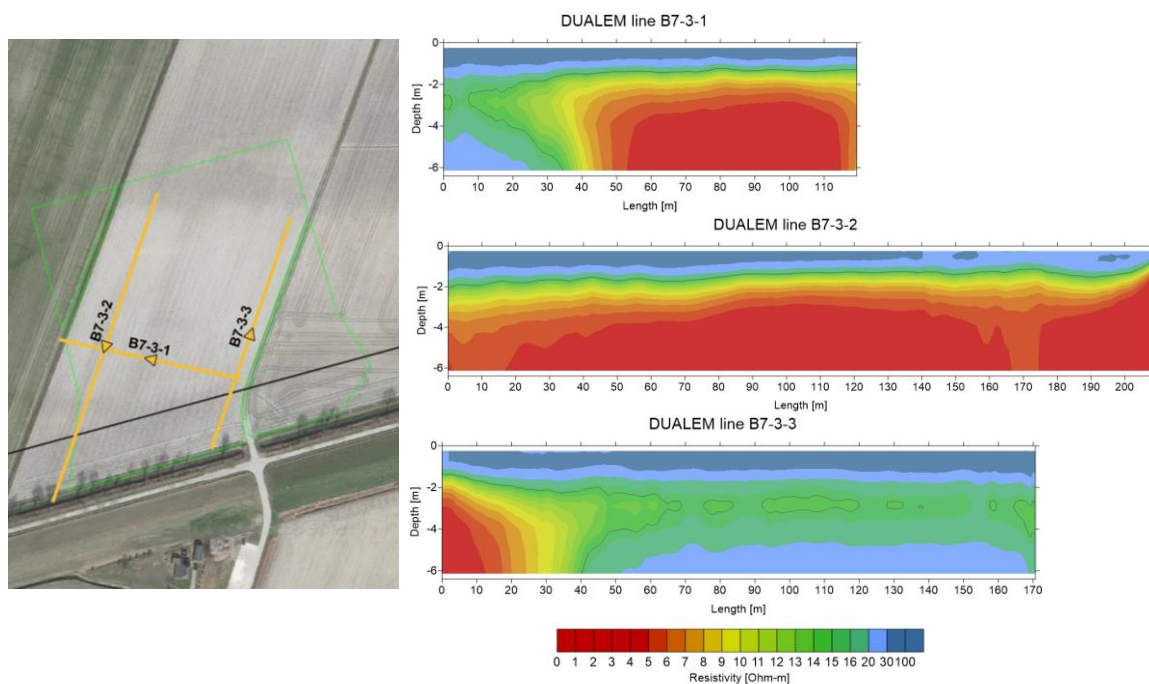


Figuur 5. Chloridegehalte op 2m beneden NAP volgens LHM zoet-zout (boven), en spreiding van de uitgevoerde DUALEM-metingen langs het tracé (onder).

De metingen zijn uitgevoerd op diverse percelen verspreid langs het tracé, om zo de diversiteit in bodem en kwel te dekken (Figuur 7, onder). De metingen vonden plaats aan het eind van de winter, in februari/maart 2023. Hierdoor kan worden aangenomen dat de zoetwatervoorraad tot het maximale niveau was aangevuld op het moment van meten.

In Figuur 6 worden, ter illustratie, de DUALEM resultaten van één van de locaties weergegeven. Op deze locatie zijn drie profielen gelopen, waardoor er drie dwarsdoorsneden tot een diepte van 6 m zijn verkregen. De dwarsdoorsneden tonen de

elektrische weerstand van de bodem, met in rood een extreem lage weerstand en in blauw een hoge weerstand. Hoge weerstanden worden gerelateerd aan zand en/of zoet water, lage aan klei en/of zout. Een uitgebreidere beschrijving van de resultaten is terug te vinden in Bijlage 2 – DUALEM rapportage.



Figuur 6. Overzicht van de gelopen profielen op locatie B7-3 (links) en de bijbehorende resultaten van de DUALEM-metingen (rechts). De metingen laten de grote variatie in diepteligging van het zoet-zoutgrensvlak binnen een perceel zien.

Een samenvatting van de resultaten van het onderzoek wordt weergegeven in Tabel 3. Er kan worden geconcludeerd dat  $\pm 70\%$  van de gemeten percelen, (lokaal) te maken heeft met een ondiepe ligging van het zoet-zout grensvlak ( $< 3$  m -mv). Naar verwachting zal het grensvlak in de zomer op deze percelen nog ondieper liggen. Daarnaast benadrukken de resultaten de heterogeniteit van de kweldruk en de sterke variatie in diepteligging van het zoet-zout grensvlak. Zelfs binnen een perceel kan de diepteligging van het zoet-zout grensvlak al sterk variëren (Tabel 3). De Vergelijking kwelkaarten volledige resultaten van het DUALEM onderzoek zijn terug te vinden in Bijlage 2 – DUALEM rapportage.

Tabel 3. Overzicht van de resultaten van de metingen. Voor de interpretatie van de resultaten is het zoet-zout grensvlak gedefinieerd als zijnde 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Cl = 1500 mg/l)

Cluster	Diepte zoet-zout (m -mv)	Toelichting
<b>B1-1</b>	2.5 - 3.0	O.b.v. het bodemtype en de gemeten weerstanden lijkt het grondwater lichtbrak te zijn vanaf een diepte van 2.5-3 m. Naar het zuidwesten van het perceel is het grondwater vanaf 4 m brak
<b>B1-2</b>	>6	In de lager gelegen zuidwestelijke hoek ligt het grensvlak op 2.0-2.5 m daarna zakt het uit tot onder het meetbereik (>6 m)
<b>B1-3</b>	>6	Alleen langs de waterlopen ligt het grensvlak op 2.0-2.5 m diepte, op de rest van het perceel ligt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B2-0</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt
<b>B2-1</b>	2.0 - 2.5	Sterke variatie binnen het perceel. Aan de noordkant ligt het grensvlak >6 m diep, aan de zuidkant reikt het brakke grondwater tot 2m diepte.
<b>B2-3</b>	2.0 - 2.5	Alleen de oost kant van het perceel heeft een ondiep grensvlak. Op het overgebleven gedeelte ligt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B3-1</b>	2.0 - 3.0	Sterke variatie binnen het perceel. Voornamelijk aan de noord- en oostkant van het perceel is het grondwater brak. In het zuiden ligt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B3-3</b>	2.0 - 4.0	Variatie binnen het perceel. Het grensvlak ligt op 2.0 m bij de zuidelijke waterloop, zakt uit tot 4 m op 50m afstand van de waterloop, en ligt daarna buiten meetbereik (>6 m)
<b>B4-1</b>	>6	Brak grondwater alleen aanwezig in de noordoostelijke hoek, op circa 2.5 m diepte
<b>B4-3</b>	>6	Brak grondwater alleen aanwezig in de noordoostelijke hoek, op circa 2.5 m diepte
<b>B5-1</b>	1.5 - 2.5	Brak grondwater op vrijwel het hele perceel. De ligging van de drainage en de zoetwaterlenzen zijn duidelijk terug te zien in de metingen.
<b>B5-2</b>	1.5 - 2.5	Gemeten weerstanden op dit perceel zijn laag. Op het noordwestelijke deel van het perceel bevindt het grensvlak zich vermoedelijk op een diepte van 1.5-2 m. In oostelijke richting zakt het grensvlak iets dieper naar ongeveer 2-2.5 m.
<b>B5-3</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt
<b>B6-1</b>	1.5 - 2.0	Gemeten weerstanden over het algemeen laag, wat duidt op een ondiepe ligging van het grensvlak (1.5-2 m). In het noorden, bij de zeedijk, stijgt de weerstand sterk op 6 m diepte. Deze weerstandstoename duidt op de lokale aanwezigheid van lichtbrak tot zoet grondwater op 6 m diepte.
<b>B6-3</b>	1.0 - 3	Dicht langs de zuidelijke watergang ligt het grensvlak erg ondiep (1 m), verder het perceel in naar het noordwesten, zakt het naar ca. 3m diepte. Aan de noordoost kant, zakt het brakke grondwater verder weg en is het vermoedelijk lichtbrak.
<b>B7-1</b>	2.0 - 3	Lichtbrak tot brak grondwater. De diepte van het zoet-zout grensvlak wordt o.b.v. de metingen geschat op 2-3 m. Aan de westkant van het perceel is het zoutgehalte waarschijnlijk hoger dan aan de oostkant.

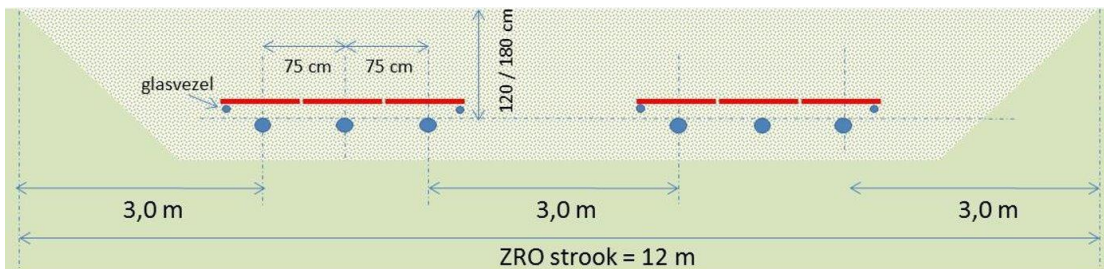
<b>B7-3</b>	1.5 - 3	Sterke variatie binnen het perceel. Brak grondwater aan de westelijke en zuidelijke zijde van het perceel, oostelijk zakt het grensvlak abrupt af buiten het meetbereik (> 6m)
<b>B8-1</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt
<b>B9-2</b>	1.0 – 2.0	Grensvlak erg ondiep aan de zuid- en oostkant van het perceel. Aan de noordwestzijde zakt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B9-3</b>	1.0 – 1.5	Gemeten weerstanden extreem laag. Grensvlak erg ondiep op 1-1.5 m over het hele perceel. Invloed van de drainage terug te zien in metingen.
<b>B10-1</b>	2.0 - 2.5	Grensvlak het ondiepst (<2 m) aan de zuidkant van het perceel. Naar het noordoosten, nemen de weerstanden iets toe, wat naar verwachting samengaat met een afname van het zoutgehalte en een overgang van brak naar lichtbrak grondwater.
<b>B10-3</b>	2.5 - 4.0	Zuidelijk deel van het perceel zoet tot lichtbrak, noordelijk (midden van het perceel) wordt het brak
<b>B11-2</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt
<b>B11-3</b>	2.0 - 2.5	De scherpe overgang in weerstand laat zien dat het zoet-zoutgrensvlak hier tussen de 2-2.5 m diepte ligt. Invloed van de drainage terug te zien in metingen.

## 2.4 Aanleg tracé

Verschillende aanlegmethoden worden toegepast langs het tracé: open ontgravingen en gestuurde boringen. Het uitgangspunt is dat open ontgraving wordt toegepast, tenzij het tracé een beschermd natuurgebied, gevaarlijke buisleiding of waterstaatswerk kruist; of als effecten door een andere aanlegmethode gemitigeerd of voorkomen kunnen worden.

### Open ontgravingen

Bij open ontgravingen wordt een sleuf gegraven waarin de kabels geplaatst worden. De breedte van de sleuf op het maaiveld is vastgesteld op 12 m, met een 1:1 talud. De diepte van de sleuf staat gelijk aan 2,1 m-mv. De sleuf wordt soms tot een diepte van 1,8 m onder maaiveld opgevuld met 'backfillzand'. Dit is afhankelijk van de grondgesteldheid. Indien backfillzand wordt gebruikt wordt na het intrekken van de kabels ook boven op de kabels een zandlaag van ongeveer 30 cm komen te liggen. De onttrekking vindt plaats door middel van een horizontale drain op 2,4 m-mv. Een schematisatie van de open ontgravingen wordt in Figuur 1 weergegeven, waarbij de afmetingen van de sleuf overeenkomt het aanleggen van twee 2GW systemen in één sleuf. De ligging van de kabels kan afwijken van de schematisatie, maar deze zijn niet van belang voor het verziltingsonderzoek.



Figuur 7. Schematisatie van de sleuf van de open ontgraving. De blauwe stippen geven de kabels aan, de lichtste groene kleur de vorm van de sleuf, .

### Gestuurde boringen

Bij gestuurde boringen worden kabels aangelegd op een diepte van 10–30 m-mv. Deze methode wordt vooral toegepast om knelpunten of obstakels zoals natuurgebieden, gevaarlijke buisleidingen, wegen en waterwegen te vermijden. De maximale lengte van een HDD-boring is 1.200 m. Bij de aanleg zijn werkzaamheden vereist bij de in- en uittredepunten.

Tussen de in- en uittredepunten worden geen bemalingen uitgevoerd, maar kunnen bijvoorbeeld de mantelbuizen op maaiveld worden gelegd. Een schematisatie van de gestuurde boringen wordt weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8. Situatieschets intredepunt HDD-boring (bron: Tennet TSO).

### Mof-locaties

Iedere 1.000–1.200 m worden de kabels met elkaar verbonden (mof-locaties). Bij mof-locaties is grondaafgraving en grondwateronttrekking nodig. De ontwateringsdiepte is vergelijkbaar met die van de standaard open ontgraving. Bij het aanlandingspunt waar

de kabelroute van zee overgaat naar land is de ontwateringsdiepte met 2,5 m-mv 10 cm dieper dan de standaard open ontgraving.

## 2.5 Autonome ontwikkelingen

Waar herstel van de zoet-zout situatie langer dan enkele jaren duurt, kunnen autonome ontwikkelingen zoals klimaatverandering en bodemdaling relevant worden. Dit omdat het effect van de maatregelen en de autonome ontwikkeling gestapeld worden. Hier worden voor de sub onderzoeksvraag over autonome ontwikkelingen de relevante ontwikkelingen in het gebied en het verwachte effect daarvan op de zoetwatervoorraad toegelicht. Onder autonome ontwikkelingen scharen we ontwikkelingen die door klimaatverandering plaatsvinden, alsook ontwikkelingen als gevolg van grondgebruik (i.e. gas- en zoutwinning). Deze aspecten zijn bekeken voor de tijdshorizon tot 2050.

### 2.5.1 KNMI'23 Klimaatscenario's

Door het KNMI zijn 4 verschillende klimaatscenario's gepresenteerd voor Nederland die zijn gebaseerd op de laatste inzichten die door het IPCC verkregen zijn. Het gaat om de volgende vier scenario's:

- Ld: Lage uitstoot, verdroging. Gebaseerd op het SSP1-2.6 scenario, het op één na laagste uitstootscenario van het IPCC.
- Ln: Lage uitstoot, vernatting. Gebaseerd op het SSP1-2.6 scenario.
- Hd: Hoge uitstoot, verdroging. Gebaseerd op het SSP5-8.5 scenario, welke uit gaat van een fors stijgende uitstoot door het verbranden van fossiele brandstoffen.
- Hn: Hoge uitstoot, vernatting. Gebaseerd op het SSP5-8.5 scenario

Voor het verziltingsonderzoek zijn met name de neerslag, verdamping, en zeespiegelstijging van belang. De kerngetallen voor deze parameters voor de klimaatscenario's zoals hierboven genoemd staan in Tabel 4.

Tabel 4. Kerngetallen van de KNMI'23 klimaatscenario's voor tijdshorizon 2050. De percentages en centimeters toename en afname zijn in vergelijking met het klimaat tussen 1991 en 2020. Dit is de referentie periode.

	KNMI '23			
	Ld	Ln	Hd	Hn
Neerslag lente en zomer (%)	-7	+1	-13	-1
Pot. verdamping zomer (%)	+8	+6	+11	+7
Max. neerslagtekort groeiseizoen (%)	+22	+13	+35	+15
Zeespiegelstijging (cm)	+24	+24	+27	+27

Aan het einde van de zomerperiode zijn de zoetwaterlenzen het dunst. Dit komt omdat er weinig neerslag valt in de zomer, er veel verdamping plaatsvindt en veel water wordt opgenomen door de gewassen. In Tabel 4 is te zien dat vooral in de droge scenario's, de neerslag zal afnemen in de lente en in de zomer. Gevolg hiervan zal zijn dat over het algemeen de zoetwaterlenzen in de toekomst aan het einde van de zomer dunner zijn dan dat ze in de huidige situatie zijn. Aanvulling van de lenzen kan dan in de herfst en winter periode plaatsvinden. Echter het kan goed zijn dat de zoetwaterlenzen over de tijd in dikte gaan afnemen omdat de aanvulling in de winter niet op kan tegen de afname in de zomer. Daarnaast is te zien dat voor elk scenario ook de verdamping toe neemt. Dit zal bovengenoemde versterken en dus zal ook dit over het algemeen tot afname in de dikte van de zoetwaterlens resulteren. De stijging van de zeespiegel zal er richting 2050 voor



zorgen dat er steeds meer zoute kwel omhoog komt in de kust regio's als geen maatregelen worden genomen. Deze zoute kwel zal het zoete water verdringen of er mee mengen waardoor de zoetwaterlenzen steeds dunner zullen worden of zelfs zullen verdwijnen.

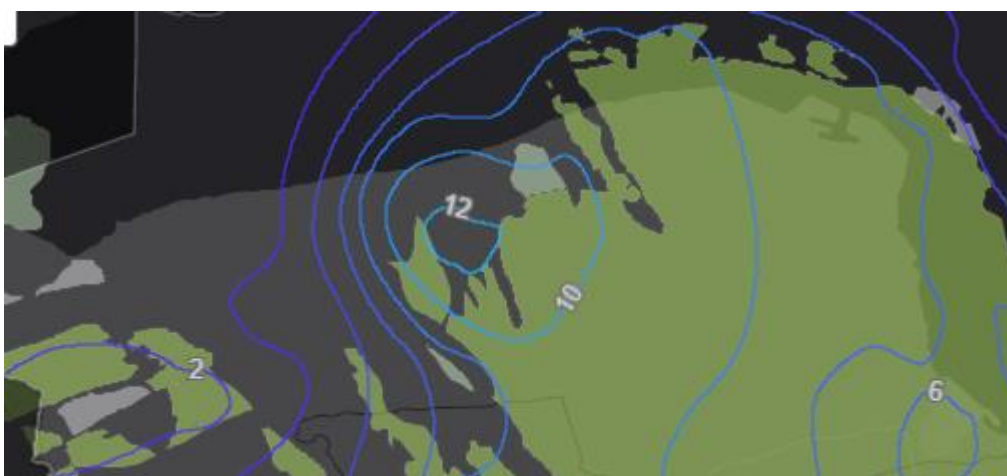
## 2.5.2 Bodemdaling

Verschillende bronnen van bodemdalingsprognoses voor 2050 zijn voor het studiegebied beschikbaar. Bronnen gaan uit van verschillende processen, waaronder alleen aardgaswinning (Figuur 9), gas- en zoutwinning samen (Figuur 10) en ontwatering, gas- en zoutwinning (Figuur 11). Het patroon van verwachte bodemdaling langs het tracé is voor de verschillende bronnen vergelijkbaar, met sterkere bodemdaling in het oosten dan in het westen. De mate van bodemdaling verschilt wel tussen de verschillende bronnen. Dit laat zien dat dit een onzekere variabele is. Opmerkelijk leidt de prognose die uitgaat van de meeste processen (ontwatering, zout- en gaswinning in Figuur 11) niet overal tot de hoogste bodemdalingsprognoses.

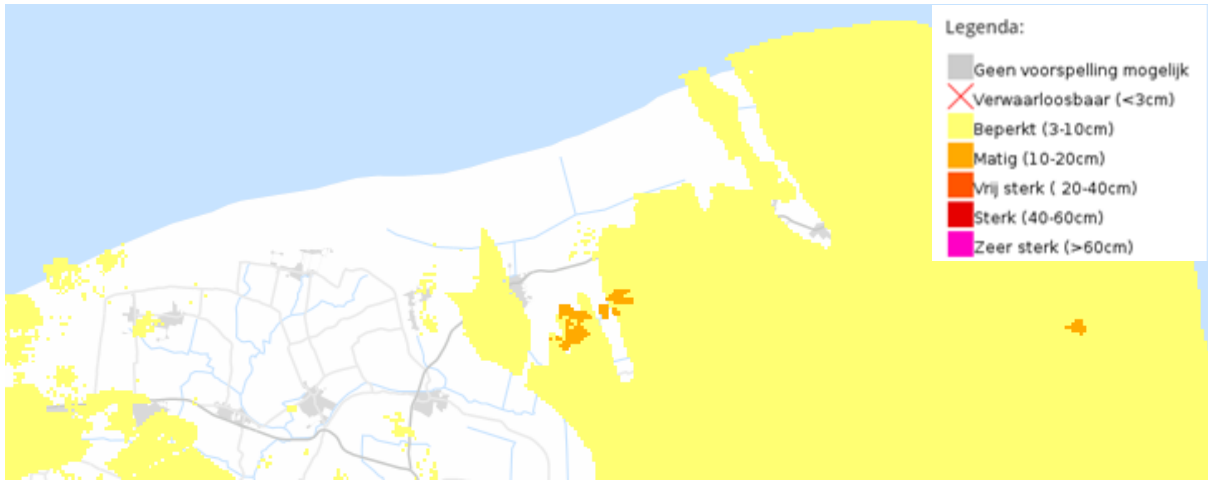
Wanneer de bodem daalt, zal de zeespiegel, ongeacht of deze stijgt of niet, automatisch omhoog komen in vergelijking met het maaiveld. Dit betekent dat voor delen die nu al onder zeeniveau liggen, deze nog verder onder zeeniveau komen te liggen. Andere delen die nu nog boven zeeniveau liggen, zullen ofwel onder zeeniveau komen te liggen of het hoogteverschil tussen zeeniveau en maaiveld zal kleiner worden. In al deze gevallen zal de zoute kweldruk toenemen, wat de zoete water lenzen kleiner maakt of verdringt.



Figuur 9. Bodemdaling tot 2018 (links) en prognose van totale bodemdaling tot 2050 (rechts) in cm uitgaande van aardgaswinning (bron: NAM 2020).



Figuur 10. Bodemdaling prognose voor de periode 2020-2050 in cm uitgaande van gas- en zoutwinning (bron:



Figuur 11. Bodemdaling prognose 2020-2050 Hoog, uitgaande van ontwatering, gas- en zoutwinning (bron: klimaateffectatlas.nl).

## 3 Aanpak

Het verziltingsonderzoek maakt gebruik van modelberekeningen om het risico op en dan de mate van verzilting langs het tracé te bepalen. Eerst zijn hydrologische standaardprofielen gedefinieerd. Elk standaardprofiel vertegenwoordigt de hydrologische situatie van meerdere percelen, die naar verwachting dezelfde effecten zullen ondervinden van de aanleg van het tracé. Voor ieder standaardprofiel zijn vervolgens modelberekeningen uitgevoerd. Door het gebruik van standaardprofielen is het aantal vereiste berekeningen aanzienlijk verminderd, terwijl de resultaten van de effectberekeningen wel vrijwel het gehele studiegebied dekken.

### 3.1 Standaardprofielen

Hydrologische standaardprofielen zijn samengesteld op basis van de veldonderzoeken en andere beschikbare data, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk. Een standaardprofiel bestaat uit een combinatie van bodemopbouw, kwelsituatie, drainage eigenschappen, en aanlegmethode. Door het clusteren van de variabiliteit langs het tracé in deze standaardprofielen die naar verwachting hydrologisch hetzelfde zullen reageren op de aanleg van het tracé, hoeft niet elk perceel afzonderlijk geanalyseerd te worden. Hieronder wordt beschreven hoe de bodemopbouw, kwelsituatie, en drainage eigenschappen bepaald zijn voor de standaardprofielen.

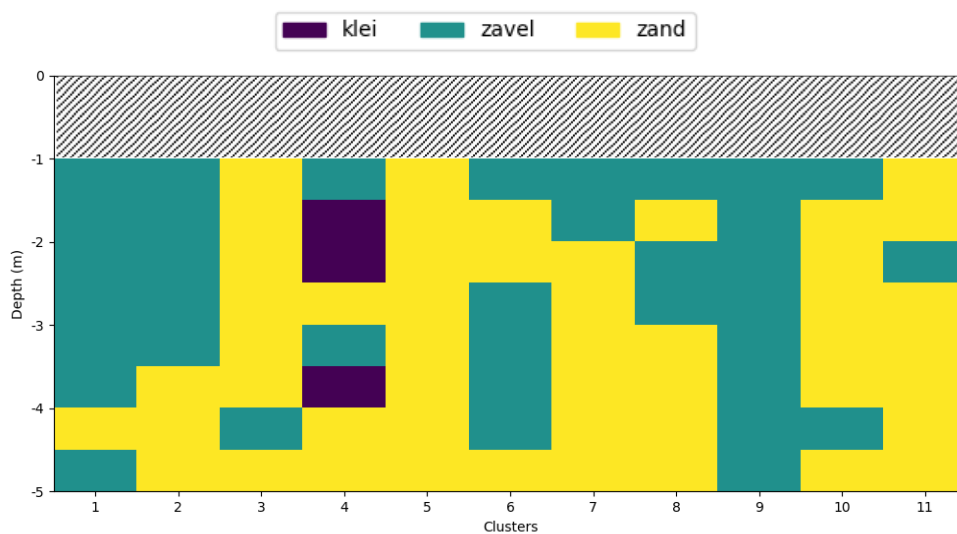
#### 3.1.1 Bodemopbouw

Ieder standaardprofiel bestaat uit een combinatie van bodemopbouw, kwelflux, drainage eigenschappen, en aanlegmethode. Eerst is bepaald hoeveel representatieve bodemprofielen er langs het beoogde tracé voorkomen, gebaseerd op GeoTop. Om het aantal standaardprofielen te beperken zijn de GeoTop gegevens gesimplificeerd tot viert hoofdklassen: Zand, Klei, Zavel & Antropogeen. Aan de hand van een clusteringalgoritme voor categorische data (category utility) zijn alle datapunten langs het tracé aan een groep toebedeeld. Een uitgebreidere omschrijving van het clusteringalgoritme is te vinden in Bijlage 3 – Clustering. Om de meest relevante standaardprofielen te krijgen, is de automatische clustering meerdere malen uitgevoerd onder wisselende parameter combinaties. Zo is er bijvoorbeeld gevarieerd in het vooraf vastgestelde aantal clusters (10, 12, 15, en 20 clusters). Ook zijn er verschillende dieptes van de standaardprofielen meegenomen in de clustering: 0-5m diepte, 0-4m diepte, en 1-5m diepte. De profielen zijn uiteindelijk geclusterd op basis van de samenstelling van de bodem tussen 1 en 5 meter onder het maaiveld. Deze diepte is gekozen omdat de gelaagdheid van de bodem op dit specifieke niveau relevant is voor de vorming van zoetwaterlenzen.

Na uitvoering van de automatische clustering is op basis van de CU waardes en hydrologische kennis, de meest relevante clustering gekozen voor het verziltingsonderzoek. De geselecteerde clustering (CU=0.20) is vervolgens verder aangepast (zie Bijlage 3 – Clustering).

Het representatieve profiel is bepaald door per laag te kijken welk bodemtype het meest voorkomt (modus). Vervolgens is er gekeken welk van de voorkomende profielen het minst afwijkt van dit profiel dat is samengesteld aan de hand van de modus per laag. Dit profiel is uiteindelijk geselecteerd als representatief voor het perceel.

De geselecteerde clustering (CU=0.20) is vervolgens verder aangepast (zie Bijlage 3 – Clustering). Uiteindelijk zijn er elf bodemclusters geïdentificeerd langs het tracé, waarvoor er per cluster een representatieve bodemopbouw is bepaald (Figuur 12).

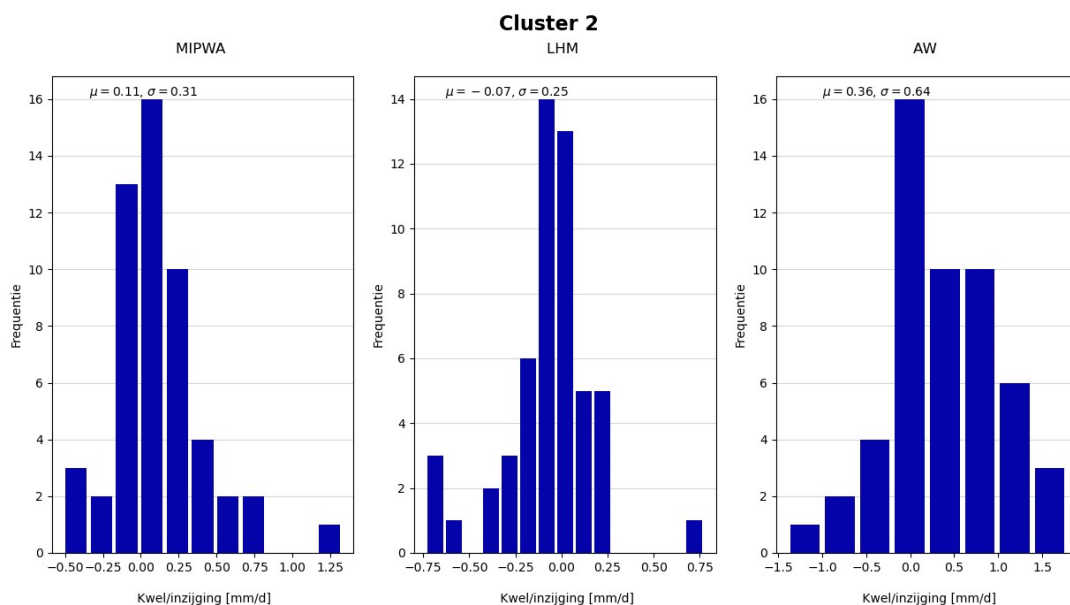


Figuur 12. Representatieve bodemopbouw voor de elf clusters langs het tracé. Het gearceerde deel (0-1 m onder maaiveld) is niet meegenomen in de clustering.

### 3.1.2 Kwelsituatie

De kwelsituatie afgeleid van de peilbuismetingen zijn waar beschikbaar de beste bron van de kwelsituatie. De standaardprofielen worden echter zo ontworpen dat ze representatief zijn voor percelen langs het gehele tracé. Daarom is ook een ruimtelijke bron van kwelsituatie nodig.

Uit de vergelijking van de peilbuismetingen en de beschikbare ruimtelijke kwelbronnen (zie hoofdstuk 2.2.2) blijkt dat er grote verschillen zijn tussen kwelkaarten. Figuur 13 laat een voorbeeld zien van de verschillen tussen de gemiddelde kwelflux voor alle punten in bodemcluster 2. Volgens LHM heb je op deze locaties te maken met inzijging, terwijl er volgens de MIPWA en Acacia Water kwelkaart sprake is van een kwelsituatie. De Acacia Water kwelkaart laat in dit geval gemiddeld een drie keer hogere kwelflux zien vergeleken met de MIPWA kwelkaart. Dit voorbeeld benadrukt de grote onzekerheid in de beschikbare kwelkaarten. Daarnaast bleek uit de vergelijking dat geen van de drie kaarten duidelijk beter overeenkomt met de kwel op basis van peilbuismetingen dan de andere twee (zie Bijlage 4 – Vergelijking kwel clusters).



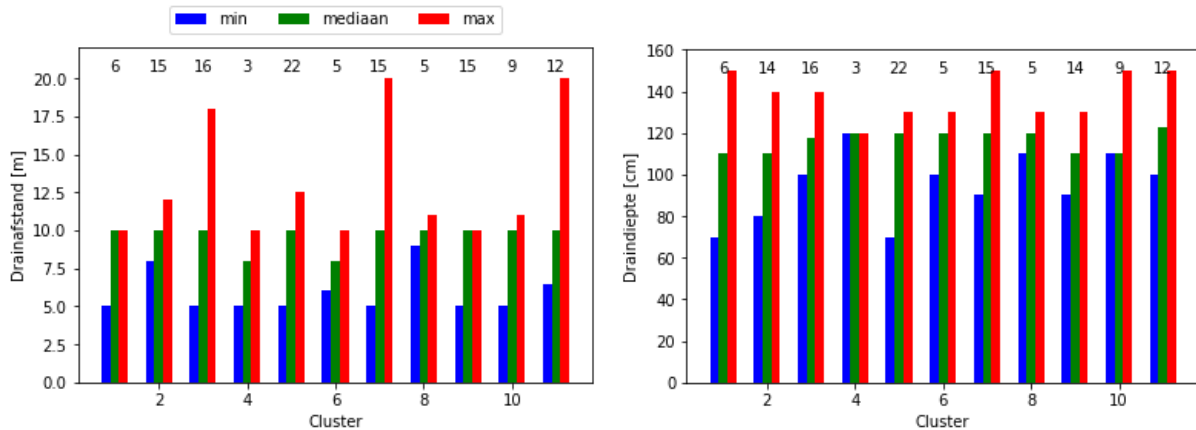
Figuur 13. Een voorbeeld van het vergelijken van de kwelsituatie op meerdere locaties aan de hand van drie verschillende bronnen.

Voor het ontwerp van de standaardprofielen is vooral van belang welke kwelfluxen langs het tracé voorkomen en hoe vaak. De variabiliteit op een enkele locatie is daarbij minder van belang. Op basis van de peilbuismetingen en ruimtelijke kwelkaarten is ervoor gekozen om in de effectberekeningen uit te gaan van twee verschillende kwelsituaties: een (zeer) lage kwel en een hogere kwelsituatie situatie. Dit omdat uit verkennende berekeningen blijkt dat de berekende verziltingsrisico en -effecten gevoelig zijn voor dit verschil. De hoogte van de kwelfluxen wordt bepaald aan de hand van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse.

### 3.1.3 Drainage

De drainageafstand en -diepte hebben invloed op de dikte van de zoetwaterlenzen, al zijn deze minder belangrijk dan bodemtype en kwelsituatie. Informatie over de drainage eigenschappen is in de periode december 2021 tot april 2022 opgehaald d.m.v. een online enquête (zie Bijlage 5 – Drainage enquête). Hierin werden verschillende vragen gesteld met betrekking tot de drainagesituatie van de percelen. De enquête is door 63 agrariërs ingevuld en heeft informatie opgeleverd over 129 percelen grenzend aan het tracé.

Per standaard bodemtype is de variatie in drainageafstand en -diepte bepaald (Figuur 14). Daaruit blijkt dat de mediaan van de drainafstand van de meeste bodemclusters rond 10 m is en de mediaan van de draindiepte van 100 – 120 cm-mv. De variabiliteit verschilt echter per bodemcluster. Voor de standaardprofielen is uitgegaan van de mediaan waarden: een drainagediepte van 1,20 m en een onderlinge drainageafstand van 10 m.



Figuur 14. Minimum, mediaan en maximum drainageafstand (boven) en -diepte (onder) per bodemcluster, met aantal responsen per bodemcluster aangegeven bovenin het figuur.

### 3.1.4 Aanlegmethode

Uit hoofdstuk 2.1 blijkt dat verschillende aanlegmethoden toegepast worden langs het tracé. Voor de berekeningen zijn echter vooral de standaard open ontgravingen van belang. Verziltingseffecten bij aanleg van het tracé worden veroorzaakt door de onttrekking van water. Bij gestuurde boringen wordt echter geen water onttrokken, waardoor geen verziltingseffecten zullen plaatsvinden.

Bij moflocaties is de ontwateringsdiepte vergelijkbaar met die bij de 'standaard' open ontgravingen. Door alleen de standaard open ontgravingen door te rekenen wordt het effect bij moflocaties dus op realistische wijze gesimuleerd.

### 3.1.5 Resultaat

De combinatie van 11 bodemclusters, twee kwelsituaties, en een enkele drainagesituatie en aanlegmethode resulteert in 22 standaardprofielen. Uitgegaan wordt van de huidige situatie, zonder verwerking van prognoses van bodemdaling, veranderingen in neerslag en verdamping, en/of zeespiegelstijging.

## 3.2 Modelling

Voor ieder standaardprofiel is een 2D dwarsdoorsnedemodel opgezet in MODFLOW6. Met dit pakket kan dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en stoftransport gesimuleerd worden. Dichtheidsafhankelijke stroming speelt een belangrijke rol bij de ontwikkeling van zoetwaterlenzen, en is daarom cruciaal in dit onderzoek.

### 3.2.1 Opzet basismodel

De diepte van het 2D dwarsdoorsnede model is 10 m. De breedte van het model moet zo gekozen worden dat de randen minimaal effect hebben op de modelresultaten. Een verkennende berekening heeft aangetoond dat een breedte van 30 keer de drainafstand (300 m) daaraan voldoet. Het model is opgebouwd uit lagen van 10 cm dikte en breedte. Dit detailniveau is nodig om de vorm van de zoetwaterlenzen goed te kunnen simuleren.

Aan de bovenrand van de modellen is een neerslagoverschot met een chloridegehalte van 0,01 g/l. Voor het neerslagoverschot is een sinus gebaseerd op het 30-jarlijkse daggemiddelde neerslagoverschot wat is gebaseerd op neerslag en verdamping tijdreeksen van KNMI station Eelde. Het neerslagoverschot is daarmee in de

winter het grootst, en in de zomer is er sprake van een neerslagtekort. De langjarige gemiddelde jaarlijkse neerslag van station Eelde wijkt minder dan 5% af van die van stations die dichterbij het tracé liggen, zoals Roodeschool, Uithuizen, Warffum, en Zoutkamp. De onderrandvoorwaarde is een vaste stijghoogte. De stijghoogte zorgt samen met een weerstandslaag ( $c = 500$  dagen) tussen 8–9 m-mv en een variabele grondwaterstand voor een tijdsafhankelijke kwelflux waarvan de gemiddelde overeenkomt met de kwelfluxen van de standaardprofielen. De kwel heeft een aangenomen chloridegehalte van 10 g/l. Op 100 m van de sleuf en aan de rechterkant is een sloot met een peil 10 cm onder drainniveau en een weerstand van 3 dagen ingebracht om naast neerslag te zorgen voor grondwateraanvulling na aanleg van het tracé tijdens de herstelberekeningen. Dit peil ten opzichte van maaiveld komt overeen met een zomerpeil dat iets hoger dan gemiddeld is in het projectgebied (25<sup>e</sup> percentiel). Verder is aan de zijkanten uitgegaan van een 'zero flux' randvoorwaarde.

De bodemopbouw is gebaseerd op de lithologie van het standaardprofiel (Figuur 12). Bodemeigenschappen zoals porositeit en doorlatendheden worden in Tabel 5 gepresenteerd. De doorlatendheid en porositeit voor zand en zavel zijn gebaseerd op de resultaten van het veldonderzoek, voor klei zijn waarden aangenomen op basis van Wösten et al. (2013). De freatische berging is gebaseerd op Johnson (1967).

Tabel 5. Overzicht van bodemeigenschappen gebruikt in de modellering

	Doorlatendheid [m/d]	Porositeit [-]	Freatische berging [-]
<b>Zand</b>	7,9	0,46	0,1
<b>Zavel</b>	1,4	0,48	0,05
<b>Klei</b>	0,15	0,56	0,03

Er is van uitgegaan dat de drains parallel aan het tracé liggen. Uit de drainage enquête blijkt dat de meeste drainage in het gebied een noord-zuid ligging heeft en daarmee dwars op het tracé ligt. De invloed van de ligging van de drainage op de effectenberekeningen is echter beperkt ten opzichte van het effect van bodemopbouw en kwel. Dit omdat drooglegging bij werkzaamheden ervoor zorgt dat grondwaterstanden onder de drainage komen te liggen, waardoor de rol van de drainage op de stromingssituatie beperkt is. Uitgegaan is van een drainafstand van 10 m, een draindiepte van 1,2 m-mv, en een drain weerstand van ongeveer 2 dagen. De eerste drain ligt een halve drainafstand, of 5 m, van de rand van het model.

### 3.2.2 Aanleg tracé

De aanleg van het tracé is gemodelleerd aan de linkerkant van het model. De sleuf zelf is ingebracht als vervorming van het maaiveld, veroorzaakt door het graven van de sleuf. De breedte van de sleuf op het maaiveld is vastgesteld op 12 m, met een 1:1 talud. De diepte van de sleuf staat gelijk aan 2,1 m onder maaiveld. De sleuf wordt tot een diepte van 1,8 m onder maaiveld opgevuld met 'backfillzand', met een aangenomen doorlatendheid van 5 m/d.

De horizontale drain onder het midden van de sleuf is gemodelleerd d.m.v. een DRN package (drainage) met een zeer lage weerstand. Hiermee wordt ervoor gezorgd dat het

geplande ontwateringsniveau gehaald wordt. Het ontwateringsniveau is gelijk aan de diepte van de horizontale drain, 2,4 m-mv.

Tabel 6. Overzicht van model uitgangspunten en of die overeenkomen met een 'best guess' of 'worst case' benadering

Uitgangspunt	Waarde	Type
Aanlegmethode	Open ontgraving	Worst case
Periode van aanleg	Natte periode (GHG)	Worst case
Onttrekkingsduur	21 dagen	Best guess

### 3.2.3 Modelberekeningen

De modelberekeningen zijn uitgevoerd in een aantal stappen. In de eerste stap zijn de modellen voor 30 jaar doorgerekend. Resultaat van deze stap is een inschatting van de dikte van de zoetwaterlenzen in de huidige situatie, en hoe deze varieert over het jaar. In de tweede stap zijn de sleuf en onttrekking toegevoegd. Het model is voor 21 dagen doorgerekend uitgaande van de in de vorige modelstap berekende grondwaterstanden en zoutgehaltes in het voorjaar, een moment waarop grondwaterstanden relatief hoog staan.

Om het herstel in te schatten wordt in een derde stap een periode van 10 jaar doorgerekend, waarin de bodemopbouw en -eigenschappen weer gelijk is gezet aan de originele situatie zonder sleuf. Als initiële condities worden voor deze herstelfase de grondwaterstanden en zoutgehaltes genomen na afloop van de 21 dagen onttrekking.

Het verziltingseffect door aanleg van het tracé is bepaald door de zoetwatervoorraad in het perceel te vergelijken met de situatie zonder sleuf. Dit is zowel direct na afloop van de werkzaamheden beoordeeld, alsook één jaar en vijf jaar na de onttrekking. De zoetwatervoorraad wordt gedefinieerd als de afstand tussen de drainagediepte en de onderkant van de zoetwaterlens. Deze is dus gebaseerd op de diepte van het zoet-zout grensvlak, die voor dit onderzoek is vastgesteld op een chlorideconcentratie van 1,5 g/l, oftewel een EC van circa 4,5 mS/cm.

### 3.2.4 Gevoeligheidsanalyse

Een Monte Carlo analyse is uitgevoerd om de gevoeligheid van de modelresultaten voor belangrijke parameters te bepalen en daarmee inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van de modelresultaten. De onderzochte parameters zijn de porositeit, doorlatendheid, de stijghoogte van het watervoerend pakket en de weerstand van de deklaag. De twee laatste parameters bepalen samen de kwelflux. De bandbreedtes van de parameters zijn gebaseerd op de spreiding van de waardes uit de veldonderzoeken. In de Monte Carlo analyse zijn 60 modelberekeningen uitgevoerd, waarbij de parameterwaardes steeds willekeurig uit de vastgestelde bandbreedte zijn gekozen.

Voor iedere modelberekening is de diepte van het zoet-zout grensvlak onder het midden van de sleuf bepaald één jaar na de werkzaamheden. De verwachting is dat de zoetwaterlenzen direct na aanleg volledig verdwenen zijn als gevolg van de onttrekkingen. De effecten na één jaar zijn daarom naar verwachting meer inzichtelijk omdat dat gerelateerd is aan hoe snel het systeem zich herstelt, en daarmee hoe



langdurig het effect is voor agrariërs. Uitgegaan is van geen mitigerende maatregelen om herstel te bevorderen.

### 3.3 Verificatie modelresultaten

Er is een model verificatie uitgevoerd om te achterhalen in hoeverre de modelresultaten overeenkomen met de veldmetingen die zijn uitgevoerd. Door dit te doen kan de betrouwbaarheid van het model beter ingeschat worden. De diepte van het zoet-zout grensvlak zoals berekend door het model, is vergeleken met de diepte van het zoet-zout grensvlak zoals gemeten met de DUALEM. Daarnaast zijn in deze vergelijking ook de kwelfluxen, die zijn berekend met behulp van data van de veldonderzoeken (boorprofielen), meegenomen.

Zoals hierboven omschreven zijn voor de verificatie drie verschillende type gegevens gebruikt, namelijk; zoet-zout grensvlak berekend door het model, zoet-zout grensvlak gemeten door de DUALEM en de kwelflux berekend aan de hand van de veldonderzoeken (boorprofielen). De eerste twee genoemde zijn direct beschikbaar.

De derde, de kwelflux, is afgeleid aan de hand van stijghoogtes, die voortkomen uit de peilbuis metingen, en aan de hand van doorlatendheden. Per locatie zijn twee peilbuizen geplaatst, een in de deklaag (à 2m-mv) en een in het watervoerend pakket daaronder (5 à 6 m-mv). Wanneer er een verschil in stijghoogte is tussen deze twee peilbuizen, kan dit resulteren in een verticale opgaande (kwelflux) of neergaande beweging van water (infiltratie flux). De volgende formules zijn gebruikt om deze (kwel)flux te berekenen;

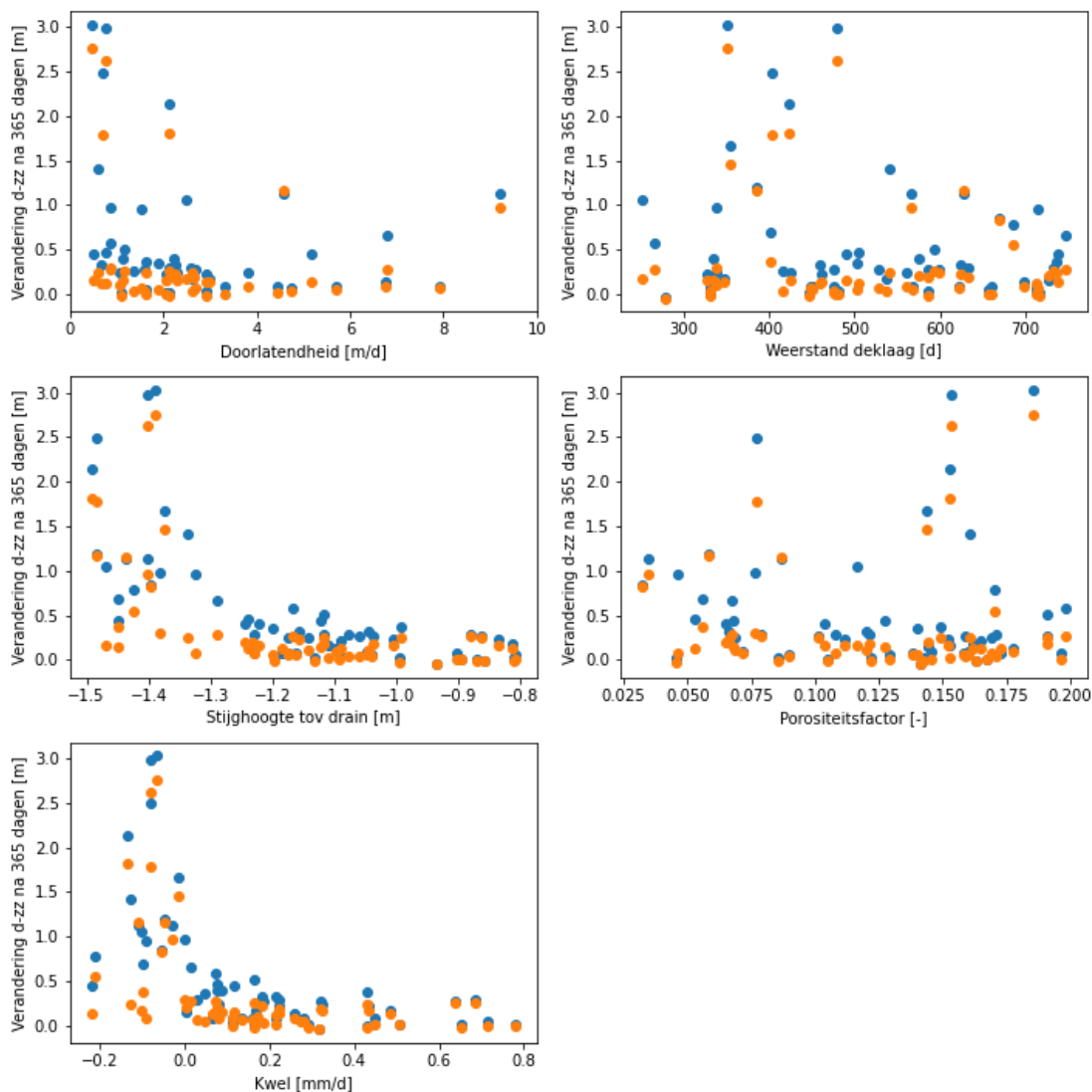
$$c = \frac{d}{Ky} \quad q = \frac{\Delta h}{c1 + c2}$$

Waarin  $c$ , de weerstand van de bodem,  $d$ , de dikte van een bodemlaag met dezelfde structuur,  $Ky$ , de verticale doorlatendheid van de specifieke bodemlaag,  $\Delta h$ , het verschil in stijghoogte tussen de twee peilbuizen en  $q$  de flux. Wanneer er verschillende bodemstructuren tussen de filters van de twee peilbuizen aanwezig zijn, wordt de weerstand voor deze lagen apart berekend en bij elkaar opgeteld. Dit wordt weergegeven door de term,  $c1 + c2$ .

# 4 Huidige situatie

## 4.1 Gevoeligheidsanalyse

Uit de resultaten blijkt dat binnen het vastgestelde bereik van de parameters vooral de doorlatendheid en de gemiddelde kwelflux het belangrijkste is (zie Figuur 15). Bij een relatief lage doorlatendheid en/of lagere kwelflux zijn berekende effecten na één jaar relatief groot. Voor het verschil tussen (quasi-)kwel neutrale situaties (gemiddelde kwelflux is bijna 0) en kwelsituaties (kwelflux > 0) is groot. De porositeit is minder van belang.



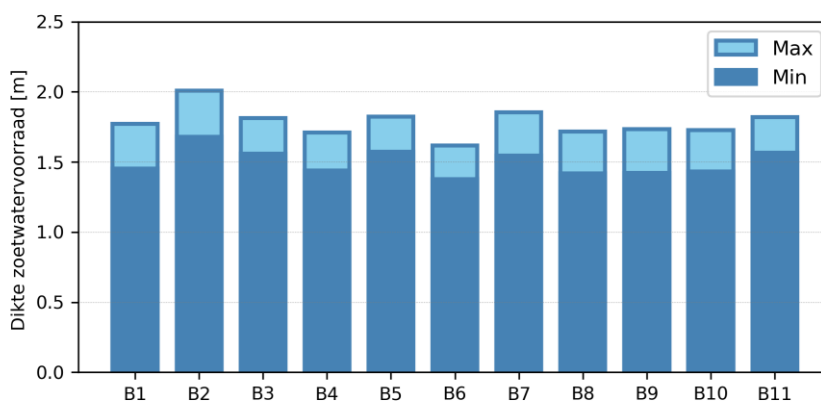
Figuur 15. Relatie tussen berekende effect op het zoet-zout grensvlak 1 jaar na de werkzaamheden en de parameters die in de Monte Carlo analyse zijn onderzocht. Blauwe kleuren zijn berekende effecten ter hoogte van de horizontale drain, oranje stippen op 10 meter van de horizontale drain.

Op basis van de resultaten wordt in de standaardprofielen uitgegaan van een lage gemiddelde kwelflux van 0,05 mm/d en een hogere kwelflux van gemiddeld 0,3 mm/d.

## 4.2 Standaardprofielen

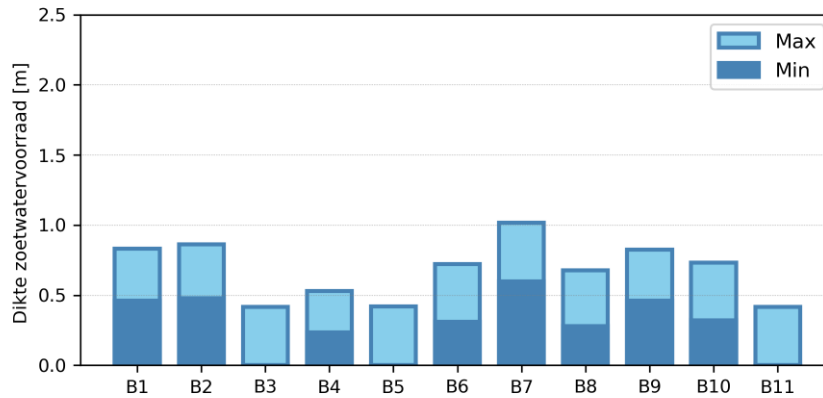
In de eerste stap van de modellering is de dikte van de zoetwaterlens bepaald voor alle standaardprofielen. De dikte van de zoetwaterlens, of de afstand tussen de draandiepte en het zoet-zout grensvlak, verschilt door het jaar heen. Aan het begin van het groeiseizoen is de zoetwaterlens relatief dik omdat het volgt op een periode met overwegend neerslagoverschot. Aan het einde van het groeiseizoen, na een periode van overwegend neerslagtekort, is de zoetwaterlens relatief dun. In Figuur 16 en Figuur 17 worden de minimale en maximale berekende dikte van de zoetwatervoorraad weergegeven voor alle standaardprofielen met respectievelijk zeer lage en lage kwelflux.

Uit Figuur 16 blijkt dat de maximale dikte van de zoetwatervoorraad voor de zeer lage kwelfluxen varieert tussen 1,6 en 2,0 m. De dikte van de zoetwatervoorraad is relatief klein voor de bodemprofielen met relatief veel gelaagdheid (B4 en B6) en relatief groot bij gelaagde profielen van zavel op zand (met name B2 en B7). Door het jaar heen varieert de dikte met ongeveer 25 – 30 cm. De variabiliteit is voor de profielen met zavel rond het niveau van het zoet-zout grensvlak (B1, B2, B7, B9) enkele cm kleiner dan voor de gelaagde en zandige profielen.



Figuur 16. Berekende minimale en maximale dikte van het zoetwatervoorraad in een gemiddeld jaar voor de standaardprofielen met een lage kwelflux van ongeveer 0,05 mm/d.

Voor de standaardprofielen met een kwelflux van gemiddeld ongeveer 0,3 mm/d varieert de maximale dikte van de zoetwatervoorraad tussen 0,4 en 1,0 m (Figuur 17), wat ongeveer 1,0 tot 1,5 m dunner dan de standaardprofielen met zeer lage kwelflux. Voor de zandige bodemprofielen B3, B5, en B11 is de dikte van de zoetwatervoorraad door de hogere doorlatendheid van de bodem relatief klein. Bij deze profielen is het zoet-zout grensvlak aan het einde van het groeiseizoen op drainniveau. De bodemprofielen met zavel tot 2 m-mv (B1, B2, B7 en B9) hebben een relatief dikke zoetwatervoorraad. Door het jaar heen varieert de dikte met ongeveer 35 – 45 cm. De variabiliteit is voor de profielen met veel zavel (B1, B2, B9) enkele centimeters kleiner dan voor profielen met veel zand (B3, B5, B7, B10, B11).



Figuur 17. Berekende minimale en maximale dikte van het zoetwaterreservoir in een gemiddeld jaar voor de standaardprofielen met een relatief hoge kwelflux van ongeveer 0,3 mm/d.

### 4.3 Verificatie modelresultaten

Er is een model verificatie uitgevoerd om te achterhalen in hoeverre de modelresultaten overeenkomen met de veldmetingen die zijn uitgevoerd. Om modelresultaten aan gemeten (DUALEM) dieptes van het zoet-zout grensvlak te koppelen is informatie over de bodemopbouw en de kwelflux nodig. In de eerste stap is aan de hand van berekende kwelfluxen bepaald welke locaties beschikbaar zijn voor de modelverificatie. In de tweede stap zijn deze locaties gekoppeld aan modelberekeningen, en zijn de gemeten en gemodelleerde dieptes van het zoet-zout grensvlak vergeleken.

#### 4.3.1 Beschikbare locaties

De kwelflux is berekend aan de hand van de methode beschreven in Sectie 3.3. Voor sommige locaties kan de kwelflux niet betrouwbaar bepaald worden doordat de onderste peilbuis zich in hetzelfde pakket (dezelfde bodemstructuur) bevindt als de bovenste. Daardoor kan er niet worden bepaald of er een neerwaartse dan wel opwaartse flux is. Om deze reden is de kwelflux alleen bepaald voor de 15 van 26 locaties waarbij de peilbuizen in verschillende bodemlagen liggen.

Daarnaast is in het model uitgegaan van zoetwaterlenzen, die vormen onder invloed van een kwelflux. Waar op basis van de peilbuizen sprake is van een neerwaartse infiltratieflux kan de locatie niet gekoppeld worden aan een vergelijkbare modelresultaat en is dus geen vergelijking mogelijk. Van de 14 locaties waarbij de verticale flux berekend kon worden blijven nog 7 over met een kwelflux waarmee de modelverificatie uitgevoerd kan worden.

#### 4.3.2 Resultaten verificatie

In Tabel 7 worden de resultaten van de verificatie weergegeven. De eerste kolom geeft de locaties en standaardprofielen weer. De tweede kolom geeft het zoet-zout grensvlak weer zoals gemeten door de DUALEM. Met behulp hiervan kan worden bekeken of het zoet-zout grensvlak gemeten door de DUALEM overeenkomt met het zoet-zout grensvlak zoals berekend door het model. Het verschil tussen de gemodelleerde diepte van het zoet-zout grensvlak in dit tabel in de dikte van de zoetwaterreservoir zoals in Figuur 16 en Figuur 17 is weergegeven is de draandiepte (1,2 m). De vierde kolom geeft de kwelflux weer die is berekend met behulp van de stijghoogten gemeten in de peilbuizen zoals in de vorige paragraaf uitgelegd. De laatste kolom geeft een eindoordeel over de vergelijking tussen DUALEM zout-zoet grensvlak en zoet-zout grensvlak zoals berekend door het

model. Belangrijk om te realiseren is dat de berekende kwelfluxen zijn gebruikt om te achterhalen welk model kwel scenario er aan de specifieke DUALEM gegevens gekoppeld moet worden: wanneer er een lage kwelflux wordt berekend worden de DUALEM gegevens gekoppeld aan het modelscenario met de lage kwelflux.

Tabel 7. Overzicht van verificatie tussen resultaten van DUALEM metingen (kolom 2) en modelresultaten (kolom 3) van het zoet-zout grensvlak per standaardprofiel. Kolom 4 geeft gemiddelde kwelfluxen weer berekend aan de hand van stijghoogten en weerstanden. Positieve fluxen geven een kwelsituatie weer, negatieve fluxen een infiltratie situatie. Of de modelberekening overeenkomt met de bijbehorende DUALEM veldgegevens is in de laatste kolom weergegeven

Locatie	DUALEM zz grensvlak range (m -mv)	Model range zz (m -mv)	Berekende kwelflux (mm/d)	Conclusie
<b>B1_1</b>	2,5 - 3,0	1,7 – 2,0	0,53	Komt niet overeen
<b>B1_3</b>	> 6	2,7 – 3,0	-0,11	Komt ongeveer overeen
<b>B3_3</b>	2,0 - 4,0	1,2 – 1,6	1,20	Komt niet overeen
<b>B5_1</b>	1,5 - 2,5	1,2 – 1,6	0,46	Komt overeen
<b>B6_3</b>	1,0 - 3,0	2,6 – 2,8	0,06	Komt overeen
<b>B9_1</b>	1,0 - 2,0	2,6 – 2,9	-0,02	Komt niet overeen
<b>B9_3</b>	1,0 - 1,5	1,7 – 2,0	0,73	Komt overeen

Op basis van de resultaten in Tabel 7 blijkt dat de DUALEM gegevens voor bijna alle standaardprofielen buiten het bereik van de gemodelleerde diepte van het zoet-zout grensvlak valt. Echter zitten de dieptes van locaties B5\_1, B6\_3, en B9\_3 wel in de buurt. Voor deze profielen is er een aardige overeenkomstigheid, zeker aangezien de modellen geen reproductie zijn van de specifieke locaties: kwelfluxen wijken over het algemeen af, en ook kunnen de bodemopbouw en drainage eigenschappen afwijken van het meest vergelijkbare standaardprofiel.

Voor profiel B1\_3 lijkt het verschil in eerste instantie groot. DUALEM geeft aan dat de diepte van het zoet-zout grensvlak dieper ligt van 6 m, terwijl het model rond 3 m zit. Relatief gezien gaat het echter om een modelberekening met een diep zout-zout grensvlak, en in het model kan een relatief klein verschil in de kwelflux een grote impact hebben op de dikte van de zoetwaterlens. Daarom is het aannemelijk dat bij gebruik van een kwelflux van gemiddeld 0,02 mm/d de dikte van de zoetwaterlens beter overeen zou komen met de metingen.

Voor profielen B1\_1, B3\_3 en B9\_2 wijkt het model echter in grotere mate af van de DUALEM gegevens. Bij twee van deze locaties, B3\_3 en B9\_2, lijken de resultaten van de DUALEM metingen echter niet overeen te komen met de berekende kwelflux. Naar verwachting ligt het zoet-zout grensvlak relatief diep bij relatief lage kwelflux, en andersom. Bij B3\_3 is de berekende gemiddelde kwelflux echter relatief hoog (1,2 mm/d) terwijl de diepte van het zoet-zout grensvlak op basis van de DUALEM metingen relatief diep zit (2–4 m-mv). Bij B9\_2 is dat andersom: de berekende kwelflux is relatief laag (0,06 mm/d) terwijl de diepte van het zoet-zout grensvlak relatief ondiep is (1–2 m-mv). Bij B1\_1 is minder duidelijk sprake van tegenstrijdigheid tussen de DUALEM meting en berekende kwelflux, maar is toch sprake van een combinatie van relatief hoge kwelflux en relatief diep zoet-zout grensvlak. Op deze locaties wordt als verkenning van de mogelijke

onzekerheid in de kwelflux de locatie vergeleken met het standaardprofiel met de andere kwelflux:

- Voor locatie B1\_1 zit het berekende zoet-zout grensvlak voor het standaardprofiel met zeer lage kwelflux op 2,7 – 3,0 m-mv. Dit komt goed overeen met de DUALEM meting van 2,5 – 3,0 m-mv.
- Voor locatie B3\_3 zit het berekende zoet-zout grensvlak voor het standaardprofiel met zeer lage kwelflux tussen de 2,8 – 3,0 m-mv. Dit komt goed overeen met de DUALEM meting van 2,0 – 4,0 m-mv.
- Voor profiel B9\_2 zit het berekende zoet-zout grensvlak voor het standaardprofiel met kwelflux van 0,3 mm/d op 1,7 – 2,0 m-mv. Dit komt goed overeen met de DUALEM meting van 1,0 – 2,0 m-mv.

Daarmee lijkt het mogelijk dat de onzekerheid in de berekende kwelfluxen een belangrijke deel van het verschil tussen gemeten en gemodelleerde dieptes in het zoet-zout grensvlak kan verklaren.

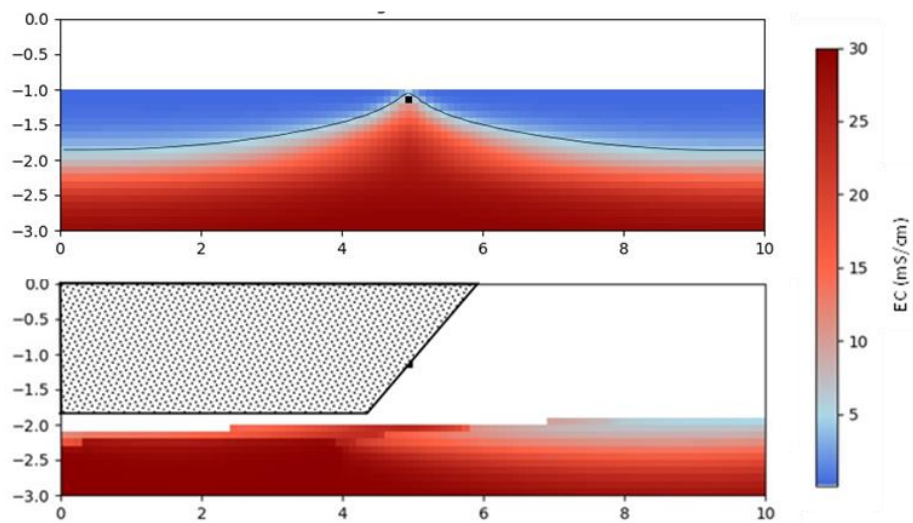
Er zijn verschillende redenen denkbaar dat de berekende kwelflux op basis van de peilbuisgegevens afwijkt van de zoet-zout situatie op basis van een interpretatie van de DUALEM gegevens. Een eerste reden is bijvoorbeeld dat het berekenen van de kwelflux afhankelijk is van verschillende variabelen die een onzekerheid met zich meebrengen; in het meten van de stijghoogte zit een onzekerheid, net als in het bepalen van de bodemstructuur en daarmee ook in het bepalen van de doorlatendheden en weerstanden. Een tweede reden is dat de kwelfluxen per locatie zijn gemiddeld over een jaar dat relatief nat was. Het is dus mogelijk dat de berekende kwelfluxen afwijken van een gemiddeld jaar. Bij relatief hoge grondwaterstanden zal de kwelflux lager uitvallen dan in een gemiddeld jaar, uitgaande dat de stijghoogten niet of in mindere mate hoger waren in dezelfde periode. De DUALEM metingen zijn in het voorjaar uitgevoerd, wanneer de zoetwaterlenzen het dikst zijn. Deze twee type veldmetingen komen dus niet overeen qua timing wat een oorzaak zou kunnen zijn voor de verschillen.

Naast de onzekerheid van de berekende kwelfluxen kunnen de modelberekeningen afwijken van DUALEM metingen vanwege verschillen in uitgangspunten. De meetlocaties zijn gekoppeld aan het meest vergelijkbaar standaardprofiel, maar de precieze bodemopbouw en drainage eigenschappen kunnen afwijken.

# 5 Effecten door aanleg tracé

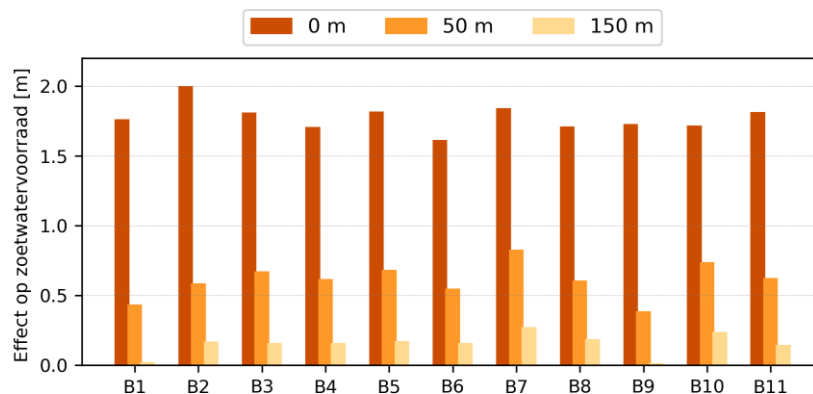
## 5.1 Effecten tijdens en direct na aanleg

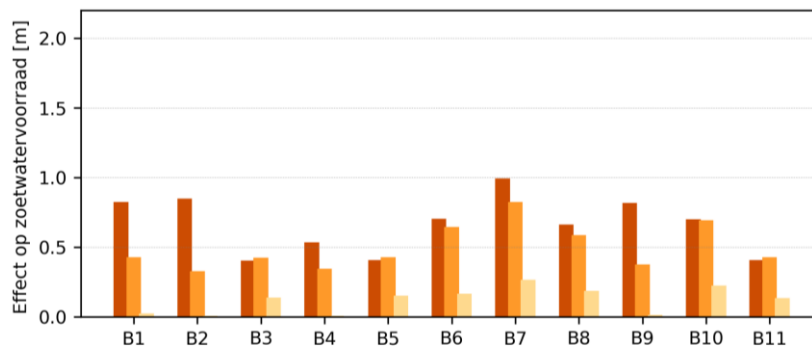
De effecten van open ontgraving op de zoetwaterlenzen in het studiegebied worden direct na aanleg beoordeeld. In Figuur 18 is, ter illustratie, een dwarsdoorsnede te zien van de effecten op de zoetwatervoorraad voor één van de standaardprofielen. In het bovenste gedeelte is de situatie voor de start van de werkzaamheden te zien. In het onderste gedeelte is de situatie direct na afloop van de werkzaamheden te zien. De grondwaterstand is uitgezakt onder de sleuf, en de zoetwaterlens direct onder de sleuf is geheel verdwenen. Voor zoetwaterlenzen naast de sleuf geldt dat er doordat water naar de horizontale drain wordt getrokken, er ook een horizontale verschuiving van de zoetwaterlens plaatsvindt.



Figuur 18. Dwarsdoorsnede rondom de sleuf van standaardprofiel B7\_hwvp25 (bodemcluster 7 en lage kwelsituatie) voor de start van werkzaamheden (boven) en vlak na de aanleg (onder). De locatie van de sleuf is gearceerd aangegeven in de onderste dwarsdoorsnede. De wit gekleurde vlakken geven de onverzadigde zone weer.

Figuur 19 geeft het effect op de zoetwatervoorraad op verschillende afstanden van het midden van de tracé weer voor alle standaardprofielen. Voor alle standaardprofielen geldt dat de volledige zoetwatervoorraad in de directe omgeving van de horizontale sleuf verdwijnt als gevolg van de werkzaamheden. De grootte van het effect ter hoogte van het midden van de sleuf (0 m) is dus gelijk aan de dikte van de zoetwatervoorraad bij aanvang van de werkzaamheden.





Figuur 19. Afname van de dikte van de zoetwatervoorraad direct na afloop van de werkzaamheden op verschillende afstanden van de horizontale drain midden onder de sleuf voor standaardprofielen met lage kwelflux (boven) en relatief hoge kwelflux (onder).

Op 50 m van het midden van de sleuf is het effect op de zoetwatervoorraad voor de lage kwel situatie tussen ongeveer 40 en 80 cm, en voor de hogere kwelsituatie waar de zoetwaterlenzen dunner zijn tussen ongeveer 30 en 80 cm. Het effect op de zoetwatervoorraad is het grootst voor bodemprofielen B7 en B10, profielen waarbij een dik zandpakket onder een zavel laag liggen. Daarna volgen de bodemprofielen met veel zand (B3, B5, en B11), en de bodemprofielen met relatief dikke zavel en/of klei lagen tussen 2 en 5 m-mv (B2, B4, B6, B8). Voor de profielen met overwegend zavel (B1 en B9) is het effect op deze afstand relatief klein. Het effect op afstand is vooral afhankelijk van de bodemtype, de kwelflux is minder belangrijk.

Op 150 m van het midden van de sleuf is het effect op de zoetwatervoorraad voor zes standaardprofielen kleiner dan 5 cm. Dit zijn de profielen die overwegend uit zavel bestaan (B1 en B9) alsook standaardprofielen met hoge kwelflux en die tot en met de diepte van de horizontale drain uit zavel en/of klei bestaan (B2 en B4). Voor de andere standaardprofielen is het effect ongeveer 15 tot 25 cm op deze afstand.

Ondanks dat de absolute effecten op de zoetwatervoorraad kleiner zijn op locaties met een hogere kwelflux (0,3 mm/d), betekent dit niet per se dat de gevolgen hier ook kleiner zullen zijn. De implicaties voor de landbouw kunnen juist groter zijn op de locaties met een kleinere oorspronkelijke zoetwatervoorraad. De dikte van de zoetwatervoorraad kan op deze locaties momenteel nét voldoende zijn om gewassen te verbouwen. Het zoet-zout grensvlak ligt hier ondiep, waardoor een kleine afname van de zoetwatervoorraad en een opschuiving van het grensvlak hier dus direct kan leiden tot het indringen van zout water in de wortelzone. Relatief gezien kunnen hier dus kleine absolute effecten grotere negatieve gevolgen hebben.

Het neerslagtekort in een gemiddeld groeiseizoen (april t/m augustus) is volgens gegevens van KNMI station Eelde 93 mm. In 2018 was dat met 236 mm ongeveer 2,5 keer zo groot. Door aan te nemen dat het verschil in dikte van de zoetwaterlens over het groeiseizoen met dezelfde factor zal toenemen wordt een worst case benadering van het effect van een extreem droog jaar benaderd. In een extreem droog jaar is het namelijk waarschijnlijk dat de werkelijke verdamping lager ligt dan referentieverdamping door bijvoorbeeld uitzakkende grondwaterstanden. Doordat het een worst case benadering is kan geconcludeerd worden dat als effecten meer dan 2,5 keer groter zijn dan de krimp van de zoetwaterlens in een gemiddeld jaar, dat het verziltingseffect groter is dan het effect van een extreem droog jaar. Andersom is echter niet duidelijk te concluderen dat een berekende effect kleiner is dan een extreem droog jaar zonder aanvullende



modelberekeningen uit te voeren waarin de afname van verdamping als gevolg van uitzakkende grondwaterstanden wordt meegenomen.

Volgens de modelberekeningen van de huidige situatie is de variatie in dikte van de zoetwaterlens uitgaande van een gemiddeld jaar 25–30 bij een lage kwelflux en 35–45 cm voor de hogere kwelflux (zie Figuur 16 en Figuur 17). Dan is een grove schatting van het effect van een extreem droog jaar als 2018 op de zoetwaterlens 0,6–0,75 m voor de lage kwelflux, namelijk 2,5 keer groter dan de variatie in de dikte van de zoetwaterlens in een gemiddeld jaar. De kans is dus groot dat de berekende effecten ter hoogte van de horizontale drain zoals hierboven beschreven zijn (ongeveer 1,6–2,0 m) groter zijn dan het effect van een extreem droog jaar. Voor de hogere kwelflux is de berekende variatie in dikte van de zoetwaterlens 25–30 cm. Uitgaande van dezelfde factor 2,5 is dit ongeveer 90–110 cm, wat groter is dan de dikte van de zoetwaterlens. Deze grove schatting van een 2,5 keer grotere variabiliteit in een extreem droog jaar is echter waarschijnlijk een overschatting. Het houdt namelijk geen rekening met een afname in verdamping door lage grondwaterstanden in een extreem droog jaar. Als gevolg hiervan is het aannemelijk dat de effecten van aanleg van het tracé groter zijn dan van een extreem droog jaar in locaties met een lage kwelflux, maar is de vergelijking in locaties met een hoge kwelflux onzeker.

### Bodemstructuur

In deze fase is het onderzoek gericht op veranderingen in de zoet-zout situatie in het perceel. Verziltingseffecten kunnen, afhankelijk van het bodemtype, ook gevolgen hebben voor de bodemstructuur. Afhankelijk van de diepte waar de veranderingen in structuur optreden kunnen deze gevolgen hebben voor de ontwikkeling van gewassen die op de percelen geteeld worden. Hier wordt kwalitatief beschreven wat de risico's zijn en onder welke omstandigheden deze verwacht worden. Een verdiepende slag kan in een vervolgfase opgepakt worden.

Veranderingen in bodemstructuur worden veroorzaakt doordat natrium in zoute omstandigheden met name de calciumionen in het klei-humus complex kunnen verdringen, waarna deze makkelijker uitspoelen (Molen, 1958). Hierdoor kan de bodem compacter worden en kan water moeilijker infiltreren. Dit effect is vooral van belang bij bodemtypes met veel klei. Op basis van de veldmetingen zijn de bodemtypes in het studiegebied echter hoofdzakelijk zand en zavel, waardoor het risico van compactie relatief laag is en het zout in de winter door percolerende neerslag snel uitspoelt. Dat sluit echter niet uit dat lokaal zwaardere bodemtypes met hoger kleigehalte kunnen voorkomen.

Op deze locaties is het van belang op welke diepte in het profiel verzilting optreedt. Direct na afloop van de werkzaamheden herstelt de grondwaterstand met (grond)water uit de omgeving. Door opmenging van relatief zoet en brak/zout omgevingswater komt volgens de modelberekeningen ter hoogte van de sleuf brak grondwater tot rond drain niveau (1,2 m-mv). Bij neerslag in de winter wordt op dit grondwater een zoetwaterlens gevormd. Dit betekent dat brak grondwater niet tot in de wortelzone van gewassen reikt, waardoor een direct effect van verzilting op bodemstructuur in de wortelzone niet verwacht wordt. Grondwater kan door capillaire aanvulling alsnog optrekken tot in de wortelzone. Met name bij lichte zavelgronden is dit effect groot, al zal het effect op bodemstructuur bij deze gronden naar verwachting beperkt zijn vanwege de lage kleigehaltes. Waar door capillaire werking en/of mening van bodemlagen bij het vullen van de sleuf toch zout in

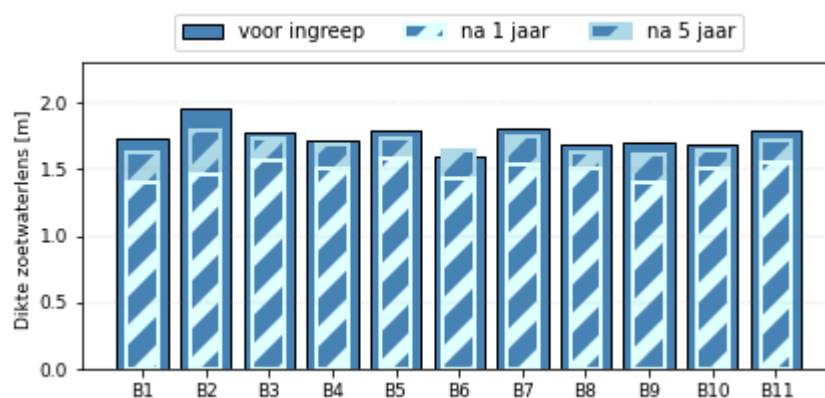
de wortelzone komt, zal herstel geleidelijk plaatsvinden. Regenwater bevat weinig calciumionen, maar de aanwezigheid van kalk in de bodem, in de vorm van schelpresten, kan deze ionen leveren.

Het herstel van de bodem gebeurt door uitspoeling van het zout door percolerend regenwater in de winter maar de overmaat aan geabsorbeerd natrium, kalium en magnesium kan enkele jaren aanhouden in zwaardere bodems. Het herstel kan dan versneld worden door toediening van gips of calciumchloride, of in calcietrijke bodems door toediening van zwavel. Van der Molen concludeerde dat toediening van gips aan de bodem de meest praktische oplossing voor herstel van overstromde bodems op grotere schaal was (Molen, 1958). Een modelstudie voor de opbreng van zout waddenslib op percelen met zand en kleibodems toonde aan dat chloride, afhankelijk van de neerslag, zeer snel uitspoelde en na 2 jaar tot onder de wortelzone (Foli and Verhagen, 2023).

## 5.2 Herstelperiode

Aanvullende modelberekeningen geven inzicht in de ontwikkeling van de zoetwatorraden in de periode na werkzaamheden, en geven daarmee een indicatie van hoe snel de zoetwaterlenzen herstellen. In Figuur 20 en Figuur 21 wordt de dikte van de zoetwatorraad net voor de werkzaamheden vergeleken met de dikte van de zoetwatorraad één en vijf jaar na afloop van de werkzaamheden.

Uit Figuur 20 blijkt de zoetwaterlenzen van standaardprofielen met de lagere onderzochte kwelflux van 0,05 mm/d na één jaar nog niet volledig hersteld zijn. Na één jaar is de berekende dikte van de zoetwatorraad tussen ongeveer 15 en 50 cm kleiner dan net voor de start van de werkzaamheden. Relatief gezien zijn de zoetwaterlenzen 10–25% kleiner. Na vijf jaar is de berekende dikte van de zoetwatorraad voor negen van de elf standaardprofielen groter dan 5 cm, met een maximaal verschil van 16 cm. Voor twee standaardprofielen is het verschil in dikte na 5 jaar kleiner dan 5 cm.

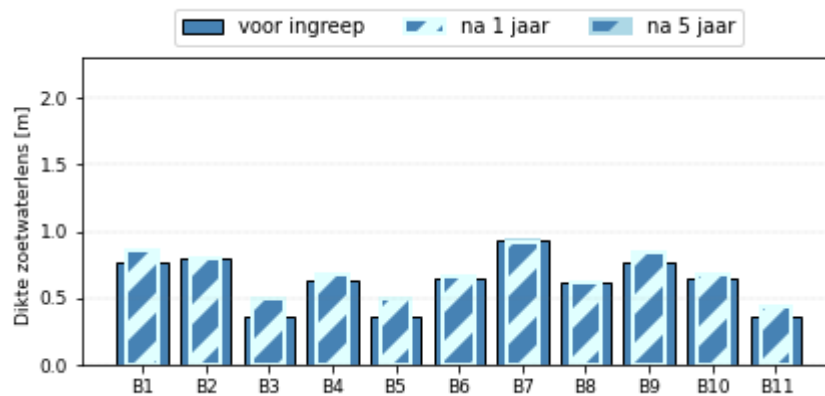


Figuur 20. Dikte van de zoetwatorraad voor aanvang van de werkzaamheden, alsook één en vijf jaar na afloop van de werkzaamheden voor de standaardprofielen met een kwelflux van 0,05 mm/d.

Het berekende verschil na één jaar is het grootst voor profiel B2, waarvan de zoetwaterlens voorafgaand aan de werkzaamheden ook het dikst is. Ook voor de zavelige profielen (B1 en B9) is het effect relatief groot. Het verschil is relatief klein voor standaardprofielen B4, B6, B8, en B10. Dit zijn gelaagde profielen met zavel tot net onder drainniveau, met daaronder afwisselend zandige en zavel en/of kleilagen. Voor alle bodemprofielen geldt dat de dikte van de zoetwaterlens na één jaar groter is dan 1 m. Bij lensdiktes groter dan 1 m is in een eerder onderzoek in de noordelijke kustregio gesteld

dat de verziltingsrisico beperkt is (Acacia Water 2019), uitgaande van natuurlijke fluctuaties in het zoet-zout grensvlak als gevolg van de variabiliteit in neerslag, verdamping, en kweldruk. Daarbij was de verziltingsrisico gedefinieerd als de risico dat de zoetwaterlens verdwijnt, of dat brak kwelwater de wortelzone bereikt.

Voor de standaardprofielen met hogere kwelflux blijkt uit de berekeningen dat de dikte van de zoetwaterlenzen één jaar na afloop van de werkzaamheden slechts enkele centimeter verschilt van de situatie voorafgaand aan de werkzaamheden (Figuur 21). Deze kleine verschillen vallen binnen de onzekerheidsmarge van de modellen, waardoor voor deze profielen geconcludeerd kan worden dat er geen effect meer waargenomen wordt.



Figuur 21. Dikte van de zoetwater voorraad voor aanvang van de werkzaamheden, alsook één en vijf jaar na afloop van de werkzaamheden voor de standaardprofielen met een relatief hoge kwelflux van 0,3 mm/d.

Uit de berekeningen blijkt dat de kwelflux bepalend is voor de herstelperiode, vooral omdat het bepalend is voor de dikte van de zoetwaterlenzen. Eerder is echter vastgesteld dat de kwelflux ook een onzekere parameter is. De kwelflux volgens de drie onderzochte kwelkaarten en waar beschikbaar ook die afgeleid van de peilbuismetingen kan erg verschillen (hoofdstuk 2.2.2 en Bijlage 1 – Vergelijking kwelkaarten).

## 6 Mitigerende maatregelen

Er zijn verschillende mitigerende maatregelen denkbaar om verziltingsrisico te verkleinen of verziltingseffecten te verkleinen. Dat kan zowel tijdens de installatie, om zo effecten te verkleinen. Mitigerende maatregelen kunnen ook na afloop van werkzaamheden worden uitgevoerd, om herstel te bevorderen. Hier worden verschillende mogelijke mitigerende maatregelen kort beschreven. Het is echter ook belangrijk dat mitigerende maatregelen technisch haalbaar en uitvoerbaar zijn.

De effectiviteit van deze maatregelen valt buiten de scope van dit onderzoek. In de basis geldt echter dat hoe minder water wordt onttrokken tijdens werkzaamheden, hoe kleiner het verziltingsrisico.

De keuze voor mitigerende maatregelen zal gebaseerd worden op de effectiviteit om verziltingsrisico en -effecten te verkleinen, eventuele bijeffecten van de maatregelen, en de technische haalbaarheid van de maatregelen.

### Maatregelen tijdens aanleg

Er zijn verschillende manieren om het totale debiet dat onttrokken wordt tijdens de aanleg te beperken, en daarmee het verziltingsrisico of -effecten te verkleinen. Eén manier om het totale debiet te verkleinen is om de onttrekkingsduur te verkorten. Dat kan door bijvoorbeeld met kortere secties te werken die daardoor korter bemaald kunnen worden. Ook langere dagen of andere aanpassingen aan het bemalingsstrategie kunnen de bemalingsduur verkorten.

Een andere manier is om het debiet te verkleinen. Dit kan bijvoorbeeld door het tracé zoveel mogelijk aan te leggen in de droge periode, aan het einde van het groeiseizoen. Dan zijn grondwaterstanden relatief laag en hoeft dus minder water te worden onttrokken om het ontwateringsdiepte te halen. Dit heeft als bijkomend voordeel dat de natste periode, wat het meest bijdraagt aan herstel van de zoetwaterlenzen, voorkomt tussen de werkzaamheden en het volgend groeiseizoen. Deze maatregel is vooral effectief op locaties waar het verschil in de grondwaterstand in de droge en natte perioden relatief groot is. Uit de peilbuismetingen blijkt dat relatief hoge (95<sup>e</sup> percentiel) en lage (5<sup>e</sup> percentiel) grondwaterstanden verschilden met 0,5 tot 1,4 m, afhankelijk van de locatie, met een mediaan van 0,8 m.

### Alternatieve aanleg methoden

Ook kan gekozen worden voor alternatieve aanlegmethoden waarbij geen of minder water wordt onttrokken. Langs horizontaal gestuurde boringen (HDD-boringen) wordt vaak bemalen bij de in- en uittrede punten afhankelijk van de grondgesteldheid. Tussen de in- en uittrede punten, en dus langs de lengte van de boring, wordt geen bemaling toegepast. Waar een bemaling nodig is bij de in- en uittredepunten is dat uit ervaring in dit gebied minimaal omdat de ontgraving meteen wordt gevuld met boorspoeling. Doordat er geen of minimaal water wordt onttrokken is de verziltingsrisico ten opzichte van open ontgravingen verwaarloosbaar. Bij boringen is het werkterrein bij het in- en uittrede punt echter relatief groot (1.500 – 2.500 m<sup>2</sup>), waardoor agrariërs daar meer nadelige effecten kunnen ervaren. De verlaagde verziltingsrisico langs de boringen kan dus gepaard gaan met neveneffecten voor agrariërs bij in- en uittrede punten.

De trench box methode is vergelijkbaar met de open ontgraving, echter worden de activiteiten in een trein verricht. De kabels worden direct aangelegd in een sleuf van 1,5 tot 1,8 m-mv. Bij heel doorlatende bodemtypes kan een bemaling noodzakelijk zijn, die in dat geval een veel kortere duur heeft dan bij open ontgraving. De verwachting is echter dat bemaling niet noodzakelijk zal zijn binnen het projectgebied. Doordat er waarschijnlijk geen water onttrokken hoeft te worden bij deze methode in dit gebied, en anders de veel kortere bemalingsduur zal het verziltingsrisico lager uitvallen dan bij de open ontgraving. Bij deze maatregel is de verstoring van de ondiepe grondlagen in de sleufbreedte echter groot. Deze aanlegmethode is nog nooit toegepast bij de 2GW kabels, waardoor het nog niet duidelijk is of het haalbaar is voor de geplande kabelroute.

Ploegen is een methode waarbij de kabels direct ondergronds worden aangebracht. Grondafraving en grondwateronttrekking is dan alleen bij moflocaties nodig, zoals dat voor de andere aanlegmethodes ook nodig is bij moflocaties. Hierdoor zal de verziltingsrisico met name tussen moflocaties in lager uitvallen. Bij deze maatregel is de verstoring van de ondiepe grondlagen in de sleufbreedte echter groot, al beperkter in omvang dan bij de trench box. Als ploegen bij natte bodems wordt toegepast, wordt vaak de A-horizon afgegraven om verstoring van ondiepe grondlagen te voorkomen. De ontgravingsdiepte is daarmee beperkter dan bij de andere aanlegmethodes, waarbij de A, B en C-horizonten (apart) worden afgegraven en gescheiden worden gehouden. Net als bij de trench box methode is echter onduidelijk of deze aanlegmethode toegepast kan worden bij de 2GW kabels.

#### Maatregelen na afloop van werkzaamheden

Herstel kan bevorderd worden door na afloop van de werkzaamheden extra zoet water aan te voeren of zoetwater beter vast te houden. Aanvoer van zoet water kan bijvoorbeeld op het moment dat de sleuf is aangevuld tot boven de grondwaterstand (GHG), via de drainage, of met behulp van infiltratiefilters in het perceel gebracht worden. Waar oppervlaktewater relatief zoet is, kan dat als bron gebruikt worden.

Echter moet water van voldoende kwaliteit beschikbaar zijn voor deze aanvulling. Uit de berekeningen blijkt dat de zoetwaterlens ter hoogte van de horizontale drain bij alle onderzochte standaardprofielen geheel verdwenen is. Dat betekent dat de kans groot is dat de EC van onttrokken water boven agrarische schadedrempelwaardes ligt. Waar oppervlaktewater relatief zoet is, kan dat mogelijk als bron gebruikt worden. De aanwezigheid van bruinrotbacterie is echter een risico in oppervlaktewater, wat voor dit gebied in kaart gebracht zou kunnen worden met analyses.

Peilgestuurde drainage is een manier om zoetwater langer vast te houden in het perceel. Er zijn verschillende vormen van peilgestuurde drainage, maar in de basis wordt het uitstroomniveau van het drainagesysteem regelbaar. Door deze te verhogen wordt meer water vastgehouden, waardoor de dikte van de zoetwaterlens kan toenemen. Aandachtspunten zijn onder andere dat de grond voldoende doorlatend is, de doorlegging voldoende is voor verhoging van de grondwaterstand, en de kwelsituatie.

## 7 Conclusie

TenneT is in de voorbereidende fase voor het Programma Aanlanding Wind op Zee (PAWOZ). PAWOZ-Eemshaven onderzoekt de mogelijkheden voor toekomstige kabelroutes om energie van windenergiegebieden in de Noordzee naar de Eemshaven te brengen. Eén van de beoogde kabelroutes loopt door de Waddenzee en vanaf de aanlanding over land, parallel aan de Waddenzee. Een verkennend verziltingsonderzoek is uitgevoerd om verziltingsrisico's en de mate van effecten bij aanleg van het tracé te onderzoeken.

Eerst zijn representatieve zogenaamde standaardprofielen bepaald aan de hand van openbare gegevens en veldonderzoeken. Dit zijn combinaties van bodemopbouw, kwelsituatie, en een vaste set drainage eigenschappen en aanlegmethode van het tracé. Voor ieder van de 22 standaardprofielen zijn modelberekeningen uitgevoerd.

### 7.1 Berekenende verziltingsrisico

Uit de modelresultaten blijkt dat de dikte van de zoetwaterlens sterk afhankelijk is van de gemiddelde kwelflux (Tabel 8). Bij een lage gemiddelde kwelflux is de dikte van de zoetwaterlens maximaal 1,6 tot 2,0 m. Bij een hogere kwelflux van gemiddeld 0,3 mm/d is dat 0,4 tot 1,0 m. De berekende dieptes van het zoet-zout grensvlak komen in grote lijnen overeen met metingen.

Tabel 8. Overzicht van de berekende dikte van de zoetwaterlens direct voor uitvoering van werkzaamheden en het berekende effect (afname in dikte zoetwaterlens) op verschillende momenten na afloop van de werkzaamheden voor iedere standaardprofiel. De naam van de standaardprofiel is een samenstelling van de bodemprofiel en kwelsituatie (i.e. B1 laag is bodemprofiel 1 bij een zeer lage kwelflux, B2 hoog is bodemprofiel 2 met de hogere onderzochte kwelflux)

	Bodemtype	Dikte vooraf [m]	Effect direct na afloop [m]	Effect na 1 jaar [m]	Effect na 5 jaar [m]
<b>B1 laag</b>	Zavelig	1,73	1,73	0,33	0,10
<b>B2 laag</b>	Zavel op zand	1,96	1,96	0,51	0,16
<b>B3 laag</b>	Zandig	1,78	1,78	0,21	0,05
<b>B4 laag</b>	Gelaagd met klei	1,72	1,72	0,21	<0,05
<b>B5 laag</b>	Zand	1,79	1,79	0,21	0,06
<b>B6 laag</b>	Gelaagd	1,59	1,59	0,16	<0,05
<b>B7 laag</b>	Zavel op zand	1,80	1,80	0,27	0,06
<b>B8 laag</b>	Gelaagd	1,67	1,67	0,17	0,05
<b>B9 laag</b>	Zavel	1,70	1,70	0,30	0,09
<b>B10 laag</b>	Gelaagd	1,68	1,68	0,18	<0,05
<b>B11 laag</b>	Zandig	1,79	1,79	0,24	0,08
<b>B1 hoog</b>	Zavelig	0,79	0,79	0,08	<0,05
<b>B2 hoog</b>	Zavel op zand	0,80	0,80	<0,05	<0,05
<b>B3 hoog</b>	Zandig	0,37	0,37	<0,05	<0,05
<b>B4 hoog</b>	Gelaagd met klei	0,68	0,68	<0,05	<0,05

<b>B5 hoog</b>	Zand	0,37	0,37	<0,05	<0,05
<b>B6 hoog</b>	Gelaagd	0,66	0,66	<0,05	<0,05
<b>B7 hoog</b>	Zavel op zand	0,94	0,94	<0,05	<0,05
<b>B8 hoog</b>	Gelaagd	0,62	0,62	<0,05	<0,05
<b>B9 hoog</b>	Zavel	0,85	0,85	<0,05	<0,05
<b>B10 hoog</b>	Gelaagd	0,65	0,65	<0,05	<0,05
<b>B11 hoog</b>	Zandig	0,37	0,37	<0,05	<0,05

De modelberekeningen tonen aan dat door de bemalingen bij de open ontgraving de zoetwatervoorraad ter hoogte van het tracé na afloop van de werkzaamheden is verdwenen. De dikte van de zoetwaterlenzen van de standaardprofielen, wat voornamelijk bepaald wordt door de kwelsituatie, is voor de verziltingseffecten ter hoogte van het tracé en de hersteltijd belangrijker dan de bodemtype. Op afstand van het tracé is het effect op de zoetwatervoorraad vooral afhankelijk van bodemtype, en minder van kwelsituatie.

#### Effect van kwelsituatie

Het berekende effect op de zoetwatervoorraad is groter voor standaardprofielen met dikkere lenzen (i.e. met lage kwelflux) dan voor standaardprofielen met dunnere lenzen (i.e. hogere onderzochte kwelflux).

Volgens de berekeningen zijn de zoetwaterlenzen van standaardprofielen met de hogere kwelflux van ongeveer 0,3 mm/d na 1 jaar hersteld (Tabel 8). Bij lagere kwelfluxen en zoetwaterlensdiktes van ongeveer 1,6 tot 2,0 m is de hersteltijd in de orde van 5 jaar. Bij dikkere zoetwaterlenzen is het aannemelijk dat de hersteltijd langer duurt. Een hersteltijd in de orde van 5 jaar betekent dat als binnen 5 jaar aanvullende werkzaamheden worden uitgevoerd in hetzelfde gebied, er sprake kan zijn van cumulatieve effecten. De mate hiervan is ook afhankelijk van de afstand tussen de nieuwe werkzaamheden het oorspronkelijke tracé.

#### Effect van bodemtype

Voor de standaardprofielen met veel zavel (bodemtypes B1 en B9) zijn de berekende effecten van de bemalingen bij aanleg van het tracé gemiddeld vergeleken met de andere standaardprofielen. De afname in zoetwatervoorraad is voor de lage kwelsituatie ongeveer 1,7 m, en voor de hogere onderzochte kwelflux ongeveer 0,8 m. Voor deze profielen is het effect op de zoetwatervoorraad op 50 en 150 m van het tracé relatief klein. Op 150 m is het berekende effect kleiner dan 5 cm. De hersteltijd is voor de standaardprofielen met lagere doorlatendheid is vergeleken met de andere bodemsoorten relatief lang uitgaande van de lage kwelsituatie. Na vijf jaar is de zoetwatervoorraad ongeveer 0,1 m kleiner dan voorafgaand aan de werkzaamheden.

Voor de standaardprofielen met zavel op zand (bodemtypes B2 en B7) zijn de berekende effecten met 1,8 en 2,0 m voor de lage kwelsituatie en 0,8 en 0,9 m voor de hogere kwelsituatie relatief groot vergeleken met de andere bodemtypes. Het berekende effect op de zoetwatervoorraad op 50 en 150 m afstand van het tracé is afhankelijk van de doorlatendheid. Het effect is relatief groot voor het profiel met een dikker zandpakket (bodemtype B7, ca. 0,25 m) en relatief klein voor het profiel met een dikker zavelpakket (bodemtype B2, 0,19 m). De hersteltijd voor deze standaardprofielen is ook relatief lang.

Van de twee zavel op zand profielen is het effect relatief groot en de hersteltijd relatief lang voor het profiel met een dikkere zavel laag.

Voor de gelaagde profielen (bodemtypes B4, B6, B8, B10) zijn de berekende effecten met 1,6 tot 1,7 m voor de lage kwelsituatie en 0,6 tot 0,7 m voor de hogere kwelsituatie relatief klein. Het gelaagde profiel met klei heeft een relatief groot effect voor beide kwelsituaties vergeleken met de gelaagde profielen met alleen zand en zavel. Het berekende effect op de zoetwatervoorraad op 50 en 150 m is afhankelijk van de doorlatendheid. Effecten zijn voor het bodemtype met klei (bodemtype B4) relatief klein (ca. 0,15 m), en relatief hoog (ca. 0,24 m) voor het gelaagde bodemtype met het meeste zand (bodemtype B10). De hersteltijd van alle gelaagde profielen relatief kort, aangezien de het berekende effect voor deze bodemtypes bij lage kwelsituatie na 5 jaar gelijk aan of kleiner dan 0,05 m is.

Voor de standaardprofielen met veel zand (bodemtypes B3, B5, B11) zijn de berekende effecten voor de lage kwelsituatie met 1,8 m relatief hoog vergeleken met de andere bodemtypen. Voor de hogere kwelsituatie zijn de effecten met 0,4 m juist relatief klein. De berekende effecten op 50 en 150 m afstand van het tracé zijn met ongeveer 0,15–0,18 m hoger dan de bodemtypen met veel zavel, maar lager dan de andere bodemtypen. De hersteltijd is voor de standaardprofielen met veel zand is gemiddeld vergeleken met de andere bodemsoorten, met langere hersteltijden dan de gelaagde profielen, maar kortere hersteltijden dan de zavelige en zavel op zand profielen.

#### Impact van verziltingseffecten

Verwacht wordt dat de implicaties voor de landbouw voornamelijk groot zijn op locaties waar de zoetwatervoorraad voorafgaand aan de werkzaamheden relatief klein zijn.

Ondanks dat de absolute effecten misschien groter zijn op de locaties waar zoetwaterlenzen relatief dik zijn, relatief gezien zijn de effecten groter bij dunne zoetwaterlenzen. Bij dunne zoetwaterlenzen kunnen relatief kleine veranderingen in zoetwatervoorraad het verschil maken tussen wel of geen zoutschade. Bij de dikkere lenzen van de standaardprofielen met lage kwelflux komt de dikte van de zoetwaterlens na één jaar overeen met een beperkte verziltingsrisico volgens de categorisatie van de verziltingsrisicokaart (Acacia Water 2019).

## 7.2 Autonome ontwikkelingen

In het gebied spelen verschillende autonome ontwikkelingen die invloed kunnen hebben op de zoetwatervoorraad. Dit zijn onder andere zeespiegelstijging, bodemdaling (door klimaat verandering en door bodem gebruik), en veranderingen in neerslag en verdamping. De berekende hersteltijden zijn met maximaal ongeveer 5 jaar relatief kort ten opzichte van de tijdshorizonten van autonome ontwikkelingen zoals klimaatverandering en bodemdaling door grondgebruik. Daardoor wordt verwacht dat er geen rekening gehouden hoeft te worden met cumulatieve effecten van werkzaamheden bij aanleg van de kabeltracés en autonome ontwikkelingen. worden om alsnog inzicht te krijgen in verziltingsrisico's langs het gehele tracé.

## 7.3 Mitigerende maatregelen

In dit onderzoek is uitgegaan van aanleg volgens de standaard open ontgravingsmethode. Het is echter mogelijk om mitigerende maatregelen te nemen om daarmee het verziltingsrisico te verkleinen en/of de effecten te verkleinen, of om de hersteltijd van de zoetwatervoorcomens te verkleinen. Er zijn maatregelen die genomen



kunnen worden op het moment van aanleg volgens de open ontgraving methode (bijvoorbeeld aanleg in de droge periode), alternatieve aanlegmethoden, of maatregelen die het herstel kunnen bevorderen. Naar verwachting geldt: hoe meer een mitigerende maatregel het totale onttrokken debiet kan verkleinen, of hoe meer zoetwater een herstel maatregel kan aanleveren, hoe groter de verwachte effectiviteit van de maatregel. Bij keuze voor mitigerende maatregelen is het echter belangrijk om de effectiviteit van de maatregel, eventuele nadelige neveneffecten, en de technische haalbaarheid af te wegen.

## 7.4 Relevantie onderzoek en hoe verder

De uiteindelijke kabelroute om energie van windenergiegebieden in de Noordzee naar de Eemshaven te brengen kan afwijken van het gebruikte tracé in dit onderzoek. Door het gebruik van standaardprofielen kunnen de resultaten van dit onderzoek echter alsnog inzicht geven in verziltingsrisico's bij aanleg van een tracé dat een andere route volgt. Door de bodemopbouw en kwelsituatie langs het uiteindelijke tracé op te halen, kan ieder perceel langs die route gekoppeld worden aan de meest vergelijkbare onderzochte standaardprofiel. Mocht voor bepaalde locaties geen representatieve standaardprofiel zijn, dan kunnen enkele aanvullende berekeningen uitgevoerd.

Uit de modelberekeningen blijkt dat de kwelflux een belangrijke parameter is voor de dikte van de zoetwatervoorraden in de huidige situatie, maar ook de verziltingseffecten en hersteltijden. Tegelijkertijd verschillen de regionale kaarten onderling van elkaar, en ook van de metingen die in dit onderzoek zijn uitgevoerd verschillen. In een volgende fase kan dit een bron van onzekerheid zijn als verziltingsrisico's langs het tracé in kaart gebracht moeten worden. De onzekerheid kan verlaagd worden door metingen van kwelflux. Daarbij is het van belang dat er minimaal een jaar gemeten wordt. Anderzijds kunnen DUALEM onderzoeken inzicht geven in de dikte van de zoetwatervoorraad, wat een directere indicatie is van verziltingsrisico en herstelduur. Een andere mogelijke bron is FRESH Salt groundwater distribution (FRESHM) onderzoek dat eerder is uitgevoerd in Zeeland en in de planningsfase zit voor noord Nederland. Dit onderzoek zal inzicht geven in het zoutgehalte van het grondwater. Mogelijk kan aan de hand van de DUALEM of FRESHM onderzoek locaties worden gekozen voor kwelflux metingen die representatief zijn voor verschillende diktes van zoetwatervoorraden die langs het tracé voorkomen.

Dit verkennend onderzoek geeft inzicht in de risico's op en mate van verzilting langs het onderzochte tracé. In een vervolg fase, na keuze voor een kabelroute en vaststelling van de technische uitgangspunten van die route, zal verdiepend onderzoek worden uitgevoerd. Mogelijke verdiepende stappen kunnen zijn onderzoek naar de effectiviteit van mitigerende maatregelen en de invloed van weersomstandigheden (i.e. droge jaren) op de zoetwatervoorraad in de referentiesituatie en op hersteltijden.

## 8 Referenties

- Acacia Water (2019). Spaarwater – Versterken zoetwaterlens: anti verziltingsdrainage – Technische rapportage. Gouda.
- Acacia Water. (2023). *Zoetwatermetingen tracé Eemshaven west. PAWOZ: Programma Aansluiting Wind Op Zee*. Gouda.
- Antea Group. (2023). *Bodemonderzoeken t.b.v. verziltingsstudie. NOZ - TNW Ten Noorden van de Wadden - Eemshaven West*. Heerenveen.
- De Vries, F., De Groot, W. J., Hoogland, T., & Denneboom, J. (2003). *De Bodemkaart van Nederland digitaal; toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie (No. 811)*. Alterra.
- Delsman, J. R., Oude Essink, G., Huizer, S., Bootsma, H., Mulder, T., Zitman, P., & Janssen, G. (2020). *Actualisatie zout in het NHI—toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model*. . Deltares rapport 11205261-003-BGS, 1.
- Foli, E., Verhagen, S.A. (2023). Labresultaten en modelberekeningen Waddenslib (Notitie No. 231442). Acacia Water, Gouda, Nederland.
- Kuijer, P. C., Steur, G. G., Heijink, W., de Bakker, H., Boersma, O. H., & Hamming, C. (1987). *Bodemkaart van Nederland schaal 1: 50.000: toelichting bij de kaartbladen 3 West Uithuizen en 3 Oost Uithuizen*.
- Mirkin, B. (2001). Reinterpreting the category utility function. *Machine Learning*, 45, 219-228.
- Molen, W.H. van der (1958). The exchangeable cations in soils flooded with sea water (Verslag Landbouwkundig Onderzoek No. 63.17). Landbouw Hogeschool, Wageningen, 's-Gravenhage, The Netherlands.
- Wösten, H., Vries, F. de, Hoogland, T., Massop, H., Veldhuizen, A., Vroon, H., Wesseling, J., Heijkers, J., Bolman, A. (2013). BOFEK2012, de nieuwe, bodem fysische schematisatie van Nederland. Alterra-rapport 2387. Wageningen, the Netherlands, 88 p.

# Bijlage 1 – Vergelijking kwelkaarten

## Inleiding

Zoals in hoofdstuk 3.1.2 aangegeven, zijn er grote onzekerheden in de beschikbare kwelkaarten: de LHM kaart, de MIPWA kaart en de Acacia Water (2018) kaart. Het is onduidelijk welke van deze drie kwelkaarten het meest overeenkomt met de werkelijke situatie. Omdat kwel een belangrijk variabele is in verschillende verziltingsonderzoeken, zoals deze, is het van belang meer grip te krijgen op de betrouwbaarheid van deze kwelkaarten.

Daarom heeft er een vergelijking tussen DUALEM geofysische metingen van de ondergrond, peilbuismetingen en de kwelkaarten plaatsgevonden. In deze vergelijking stonden de volgende vragen centraal:

1. Hoe verhouden de kwelfluxen van de kwelkaarten zich tot de kwelfluxen van de peilbuizen?
2. Hoe verhouden de kwelfluxen van de kwelkaarten zich tot de kwelfluxen van de DUALEM metingen?
3. Hoe verhouden de resultaten van de peilbuizen en de DUALEM metingen zich tot elkaar?

## Methode voor vergelijking kwelkaarten met boorprofielen

De peilbuizen zijn op verschillende locaties langs het tracé geplaatst. Per locatie zijn twee peilbuizen geplaatst, één in de deklaag (à 2 m-mv) en één in het watervoerend pakket daaronder (5 à 6 m-mv). Wanneer er een verschil in stijghoogte is tussen deze twee peilbuizen, kan dit resulteren in een verticale opgaande (kwelflux) of neergaande beweging van water (infiltratie flux). De volgende formules zijn gebruikt om deze (kwel)flux te berekenen. Met behulp van de stijghoogtes, die voortkomen uit de peilbuis metingen, en aan de hand van doorlatendheden kan een infiltratie of kwel flux worden berekend. Dit is gedaan met de volgende formules:

$$c = \frac{d}{Ky} \quad q = \frac{\Delta h}{c1 + c2}$$

Waarin  $c$ , de weerstand van de bodem [ $d$ ],  $d$ , de dikte van een bodemlaag met dezelfde structuur [ $m$ ],  $Ky$ , de verticale doorlatendheid van de specifieke bodemlaag [ $m/d$ ],  $\Delta h$ , het verschil in stijghoogte tussen de twee peilbuizen [ $m$ ] en  $q$  de flux [ $m/d$ ]. Wanneer er verschillende bodemstructuren tussen de filters van de twee peilbuizen aanwezig zijn wordt de weerstand voor deze lagen apart berekend en bij elkaar opgeteld. Dit wordt weergegeven door de term,  $c1 + c2$ .

Doordat niet alle peilbuis paren correct geplaatst zijn, heeft het voor sommige paren geen toegevoegde waarde om een flux te berekenen. Namelijk, wanneer de onderste peilbuis zich in hetzelfde pakket (dezelfde bodemstructuur) bevindt als de bovenste, kan er met deze berekening geen betrouwbare kwelflux berekend worden. Daarom is alleen voor de peilbuizen waarbij dit wel het geval is de flux berekend. Dit is gedaan voor 14 van de 26 paren peilbuizen.

### Methode voor vergelijking kwelkaarten met Dualem metingen

Voor elke locatie zijn ook DUALEM metingen uitgevoerd. De resultaten van deze metingen zijn vergeleken met de waarden van de kwelkaarten. Uit de figuren van de DUALEM metingen is de diepte van het zoet zout grensvlak af te leiden maar niet direct de kwelflux. Wel kan aan de hand van de diepte van het zoet zoutgrensvlak en de beschrijving bij elke meting, worden afgeleid of er een hoge kwelflux, gemiddeld/lage kwelflux of kwel neutrale/infiltratie situatie is. Deze klassen zijn vervolgens ook gebruikt om te relateren aan de waarden die uit de kwelkaart naar voren komen. De volgende klasindeling is gebruikt:

- $> 0,5$  mm/d = hoge kwelflux;
- $0,1 < 0,5$  mm/d = lage/gemiddelde kwelflux;
- $< 0,1$  mm/d = kwelneutraal/infiltratie.

Voor het in klassen delen van de DUALEM metingen zijn de volgende aannamen gedaan:

- Wanneer het zoet, zout grensvlak ondiep ligt (1,5-2,5 m) dan is de kwelflux geklasseerd als hoog;
- Grensvlak op een diepte van 2.5 tot 6 m dan geklasseerd als lage/ gemiddelde kwelflux;
- Grensvlak op een diepte groter dan 6 m dan geklasseerd als kwelneutraal/infiltratie.

### Resultaten vergelijking kwelkaarten met peilbuismetingen

Wat betreft de resultaten voor de peilbuizen is er geen eenduidig antwoord op welke kwelkaart het best overeen komt met de berekende kwelfluxen. De resultaten zijn samengevat in het linker gedeelte van Tabel 9 Tabel 7. Doormiddel van de kleuren rood, oranje en groen is (visueel) beoordeeld of de waarden, respectievelijk, slecht, matig of goed met elkaar overeenkomen. Er is te zien dat er behoorlijke verschillen zitten tussen de metingen en de kwelkaarten. Infiltratie (negatieve getallen) en kwel situaties (positieve getallen) op een locatie komen vaak niet overeen en eveneens zitten er tussen de waarden zelf ook grote verschillen.

Echter is het berekenen van de kwelflux afhankelijk van verschillende variabelen die een onzekerheid met zich meebrengen; in het meten van de stijghoogte zit een onzekerheid, net als in het bepalen van de bodemstructuur en daarmee ook in het bepalen van de doorlatendheden. Daarnaast is de kwelflux ook gevoelig voor verandering van deze variabelen. Deze onzekerheden komen dus terug in de uiteindelijke kwelflux. Dit zou een oorzaak kunnen zijn voor de slechte overeenkomst tussen de verschillende kwelkaarten an sich en vervolgens ook slechte overeenkomsten tussen de kwelkaarten en de berekende kwelfluxen. Conclusie met betrekking tot de resultaten van de peilbuismetingen is dat er matige/ slechte overeenkomstigheid is tussen de kwelkaarten en de berekende kwelfluxen.

### Resultaten vergelijking kwelkaarten met DUALEM gegevens

De rechterzijde van Tabel 9 geeft de resultaten weer van de vergelijking tussen de kwelkaarten en de DUALEM metingen. De diepte van het zoet zout grensvlak zoals gemeten door de DUALEM wordt weergegeven en in de kolommen daarna wordt weergegeven in welke klassen de kwelfluxen van de kwelkaarten en de DUALEM gegevens vallen (zoals uitgelegd in de paragraaf over de methode). De kleuren zijn gebruikt om te accentueren in welke klasse de flux valt. Dit is vervolgens samengevat in Tabel 10; hier wordt weergegeven het aantal keer dat de verschillende kwelkaarten en de metingen in dezelfde klasse vallen. Te zien is dat voor zowel voor de vergelijking van de

kwelkaarten onderling als voor de vergelijking tussen kwelkaarten en metingen minder dan de helft van de locaties in dezelfde kwelklasse vallen (in totaal zijn er 25 locaties meegenomen). Uitzondering zijn het LHM en MIPWA die meer met elkaar overeen komen.

## Conclusie

Uit de vergelijkingen blijkt dat:

- De resultaten van de DUALEM metingen en peilbuismetingen niet goed met elkaar overeenkomen. Een oorzaak hiervoor zou kunnen zijn dat het berekenen van de kwelflux onzekerheid met zich mee brengt. De indicatie voor de kwelflux van de DUALEM metingen worden betrouwbaarder geacht, maar hierbij moet ook gerealiseerd worden dat het vertalen van DUALEM figuren naar kwel klassen ook subjectiviteit met zich mee brengt.
- De resultaten van de DUALEM metingen en peilbuismetingen komen verder ook matig/niet overeen met de kwelfluxen van de kwelkaarten.
- MIPWA en LHM geven overwegend aan dat de kwelflux laag tot neutraal is. De kwelkaart 2018 geeft voor een aantal locaties wel een hogere kwel. De DUALEM metingen geven voor ongeveer een derde van de locaties (7 stuks) een hoge kweldruk aan. Dit wordt niet bevestigd door één van de kwelkaarten. De kwelkaart 2018 geeft wel voor een 9-tal locaties een hoge kweldruk, maar deze komen niet goed overeen met de locaties van de DUALEM metingen.

Uit de vergelijking blijkt dat alle drie de kwelkaarten niet goed overeenkomen met de meetgegevens. Naast de redenen die hierboven worden gegeven komt dit waarschijnlijk ook omdat de metingen een puntmeting betreffen op perceelniveau. Ook wordt de kwelflux bepaald door de diepte van het maaiveld, drain diepte en polderpeil, het kan goed dat deze op perceelschaal in de regionale data net niet goed is opgenomen. Misschien zit er te veel lokale variabiliteit in de kwelflux (die uit de metingen blijkt) om dit goed weer te kunnen geven met een van de drie kwelkaarten.

Tabel 9 De linkerzijde van deze tabel geeft een vergelijking van de kwelkaarten met de boorprofielen. Rood = slechte overeenkomst, oranje = matige overeenkomst en groen = goede overeenkomst. Negatieve getallen geven een infiltratie situatie weer, positieve getallen een kwel situatie. De rechter tabel geeft weer of aan de waarden van de kwelkaarten dezelfde klasse is toegekend als aan de DUALEM metingen. Afkorting neu is neutraal en gem is gemiddeld.

Meetpunt	Kwelflux AW_2018 (mm/d)	Kwelflux LHM (mm/d)	Kwelflux MIPWA (mm/d)	Kwelflux berekend (mm/d)	Diepte zz Dualem (m -mv)	kwel klasse DUALEM	kwel klasse AW_2018	kwel klasse LHM	kwel klasse MIPWA	kwel klasse Berekend
B1_3	0.55	0.24	0.15	-0.10	> 6	neu	hoog	gem	gem	neu
B3_3	1.53	0.24	0.03	1.20	2.0 - 4.0	gem	hoog	gem	neu	hoog
B9_3	0.97	-0.22	0.85	0.73	1.0 - 1.5	hoog	hoog	neu	hoog	hoog
B6_3	0.12	0.43	0.18	0.06	1.0 - 3.0	gem	gem	gem	gem	neu
B2_1	0.41	0.25	0.23		2.2 - 2.5	gem	gem	gem	gem	
B9_1	0.56	-0.13	0.16	-0.02	1.0 - 2.0	hoog	hoog	neu	gem	neu
B5_3	1.34	-0.05	-0.09		> 6	neu	hoog	neu	neu	
B2_0	-0.28	-0.03	-0.15		> 6	neu	neu	neu	neu	
B7_3	0.74	-0.01	-0.05	-0.74	1.5 - 3	gem	hoog	neu	neu	neu
B10_3	1.09	0,00	0.02		2.5 - 4.0	gem	hoog	neu	neu	

Meetpunt	Kwelflux AW_2018 (mm/d)	Kwelflux LHM (mm/d)	Kwelflux MIPWA (mm/d)	Kwelflux berekend (mm/d)	Diepte zz DuaLEM (m -mv)	kwel klasse DUALEM	kwel klasse AW_2018	kwel klasse LHM	kwel klasse MIPWA	kwel klasse Berekend
B8_1	0.06	-0.04	-0.15		> 6	neu	neu	neu	neu	
B5_1	0.09	-0.1	-0.15	0.46	1.5 - 2.5	hoog	neu	neu	neu	gem
B6_1	0.13	-0.08	-0.05		1.5 - 2.0	hoog	gem	neu	neu	
B4_1	-0.05	-0.02	0.13	-1.61	> 6	neu	neu	neu	gem	neu
B3_1	0.23	-0.28	-0.03		2.0 - 3.0	gem	gem	neu	neu	
B11_2	1.19	-0.25	0.13		> 6	neu	hoog	neu	gem	
B2_3	1.78	-0.13	0.06	0.55	2.0 - 2.5	gem	hoog	neu	neu	hoog
B7_1	0.05	-0.13	0.15	2.51	2.0 - 3.0	gem	neu	neu	gem	hoog
B5_2	0.17	-0.01	0.24		1.5 - 2.5	hoog	gem	neu	gem	
B11_3	0.40	0.67	0.74		2.0 - 2.5	hoog	gem	hoog	hoog	
B10_1	0.01	-0.01	0.02	-0.57	2.0 - 2.5	hoog	neu	neu	neu	neu
B1_2	-0.06	0.14	0.20	1.40	> 6	neu	neu	gem	gem	hoog
B1_1	-0.35	0.19	0.16	0.53	2.5 - 3.0	gem	neu	gem	gem	hoog
B11_1	0.02	0.01	0.10	0.13			neu	neu	neu	gem
B4_3	-0.2	-0.07	0.43	-0.97	> 6	neu	neu	neu	gem	neu

Tabel 10 Deze tabel is een samenvatting van de rechterzijde van Tabel 4. Weergegeven wordt het aantal keer dat de verschillende kwelkaarten en de metingen in dezelfde klasse vallen.

	DUALEM	AW	LHM	MIPWA	Berekend *
DUALEM	-	9	10	10	4
AW	-	-	9	7	4
LHM	-	-	-	17	4
MIPWA	-	-	-	-	4

\* Voor de berekende kwelfluxen kan maar 15 keer vergeleken worden.

## Bijlage 2 – DUALEM rapportage



# Zoetwatermetingen tracé Eemshaven west

PAWOZ Programma Aansluiting Wind Op Zee



# Zoetwatermetingen tracé Eemshaven west

PAWOZ Programma Aansluiting Wind Op Zee

## Colofon

### Klant

TenneT

### Status

Definitieve rapportage extern gebruik

### Datum

17 juni 2024

### Projectnummer

AW24\_172\_MS\_221326

### Auteur(s)

Siebinga, M

### Gecontroleerd door

T. van Hateren

### Vrijgegeven door

Arjen de Vries

## Disclaimer

Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via [info@acaciawater.com](mailto:info@acaciawater.com)

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Processen die het zoutgehalte in een perceel bepalen</b>	<b>3</b>
	2.1 Zoutgehalte ondiepe grondwater	3
	2.2 Zoutgehalte van bodemvocht	5
	2.3 Zoutgehalte van afvoer van drains en greppels	5
<b>3</b>	<b>Geofysische meetmethoden</b>	<b>7</b>
	3.1 Relaties elektrische weerstand, lithologie en zoutgehalten	7
	3.2 Geofysische methoden	8
	3.3 Uitvoering	7
<b>4</b>	<b>Resultaten</b>	<b>13</b>
	4.1 Interpretatie van de metingen	15
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>61</b>

# 1 Inleiding

TenneT is in de voorbereidende fase voor het Programma Aanlanding Wind op Zee (PAWOZ). Voor dit project wordt een milieueffectrapportage (MER) opgesteld. Het project betreft het realiseren van kabelverbindingen tussen windenergie gebied ten noorden van de Waddeneilanden en het Nederlandse hoogspanningsnet.

Eerder is gestart met het onderzoek naar één van de beoogde tracés in de richting van de Eemshaven. Dit tracé loopt door de Waddenzee en vanaf de aanlanding over land, parallel aan de Waddenzee. Het tracé doorkruist daarbij landbouwgronden (veelal akkerbouw). Het betreft een gebied waar sprake kan zijn van verzilting. Dit kan zijn in de huidige situatie of op termijn als gevolg van zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering (zie o.a. [www.spaarwater.com](http://www.spaarwater.com)).



Figuur 1. Locatie van één van de beoogde tracés.

Het doel van het reeds ingezette onderzoek is om inzicht te krijgen in de effecten van ingrepen bij de aanleg van de kabelverbinding op verzilting. Binnen dit onderzoek worden modelberekeningen uitgevoerd om de mogelijke effecten vast te stellen. Vastgesteld is dat voor een aantal modelparameters onvoldoende informatie beschikbaar is om betrouwbare effectberekeningen te kunnen doen. Daarom is aanbevolen aanvullend veldonderzoek te laten uitvoeren. Dit aanvullend onderzoek betreft het plaatsen van peilbuizen voor de bepaling van kweldruk en grondwaterstand, het testen van de doorlatendheid en porositeit, en ten slotte het vaststellen van de huidige zoet-zout situatie in percelen.

Om de huidige zoet-zout situatie in kaart te brengen zijn meerdere geofysica metingen uitgevoerd. De kartering dient meerdere doelen binnen het lopende onderzoek. In de eerste plaats om vast te stellen of sprake is van een zoete neerslaglens en hoe dik deze is. In de tweede plaats kan het dienen als nulmeting.

De gebruikte meetmethoden en resultaten worden in dit rapport toegelicht.

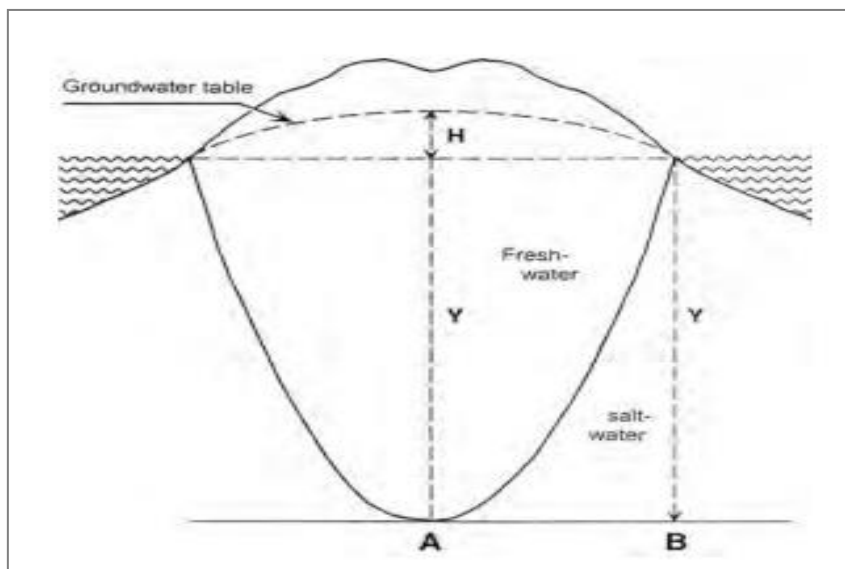
## 2 Processen die het zoutgehalte in een perceel bepalen

Dat landbouw mogelijk is ondanks de aanwezigheid van zoute kwel, is een gevolg van het neerslagoverschot in ons land. Door het neerslagoverschot wordt het zout, dat zich in de droge perioden in de bodem ophoopt, in de natte perioden weer uitgespoeld. Hierdoor neemt het zoutgehalte in de sloten in de loop van de zomer toe. Dit zout wordt uiteindelijk met het overtollige regenwater en eventuele doorspoeling naar de boezem en naar zee afgevoerd.

Het klassieke beeld is dat het bodemvocht gedurende de zomer in toenemende mate zouter wordt en in de winter door verdunning weer verzoet. Meer recent is ontdekt (o.a. verziltingsstudie Noord-Nederland, Acacia Water 2013) dat in plaats van een min of meer homogeen systeem van een met de seizoenen wisselende zoutconcentratie, er een situatie heerst waarbij het geïnfiltreerde regenwater als een zoetwaterlens op het zoutere water drijft. Deze lens vertoont een, aan de seizoenen gerelateerd gedrag van uitdijing en krimp. De vorm en de dynamiek van een neerslaglens wordt bepaald door de drainerende werking van greppels en drainagebuizen en in veel mindere mate door watergangen.

### 2.1 Zoutgehalte ondiepe grondwater

De zoetwaterlens is, afhankelijk van de lokale situatie, meestal 0 tot 4 m dik. Echter direct onder de drainagemiddelen is die meestal dunner of afwezig. Als de grondwaterstanden hoog genoeg zijn en ondiep grondwater zijdelings gaat afstromen naar de drains en greppels, komt ook brak grondwater vanuit de diepere lagen omhoog onder de drainagemiddelen.



Figuur 2. Principe van een zoetwaterlens volgens Badon Ghyben-Herzberg. Wanneer de grondwaterstand (H) 10cm ligt boven het drainageniveau dan zou de dikte van de zoetwaterbel (Y) ongeveer 4m dik moeten zijn.

Midden tussen de drainagemiddelen is de dikte van de lens dus het grootst, hoewel die kleiner is dan verwacht volgens het Badon Ghyben-Herzberg principe (Figuur 1) van licht zoet water drijvend op zwaarder brak water (De Vries, 1982)<sup>1</sup>. Op basis van dit principe zou bij een gemiddelde grondwaterstand van 10cm boven het drainageniveau een dikte van 4m onder het drainageniveau het resultaat moeten zijn.

De praktijk in percelen is echter anders. Het systeem in een perceel is zo dynamisch dat nooit de evenwichtssituatie wordt bereikt. In de winterperiode met neerslagoverschot wordt de stroming in de lenzen geactiveerd en het brakke grondwater uitgespoeld. Tijdens voorjaar en zomer dalen de grondwaterstanden tot onder de drainagebasis. In die periode stagneert de grondwaterstroming en zakken, in meer of mindere mate, ook de brakke kegels onder de drainagemiddelen in. De lenzen krimpen verder door capillaire opstijging van water naar de wortelzone en gewasverdamping. De mate van groei en krimp van de zoetwaterlenzen verschilt van jaar tot jaar. Een droge winter of een lange periode met vorst, zoals in 2010, leidt tot minder aanvulling en kleine zoetwaterlenzen.

Afgezien van het klimaat hangt de dikte van de lens tussen de drainagemiddelen en de mate van aantrekken van zout naar de drainagemiddelen af van de volgende factoren:

- a) afstand van de drainagemiddelen;
- b) bodemopbouw;
- c) niveau van de buisdrainage of greppelbodems (drainagebasis);
- d) de kweldruk.

Kleine drainage-afstanden en relatief hoge doorlatenheden leiden tot kleinere opbolling tussen de drains en zeer dunne lenzen van enkele decimeters rond het niveau van de buisdrains. In percelen met een slechtere doorlatendheid (meer klei) kunnen zich lenzen ontwikkelen tot ca. 4m dikte. Op basis hiervan onderscheiden we de zoetwaterlenzen in drie typen:

#### De **bolle lens**.

De bolle lens heeft, in de winterperiode, aan de boven- en onderkant een bolle vorm. Deze vorm ontstaat bij een homogene bodemopbouw tussen de drains. De dikte van de lens neemt toe bij grotere drainageafstanden, lagere doorlatendheid en een lagere kweldruk.

#### De **platte lens**.

De werking van de platte lens is te vergelijken met de bolle lens. Maar door de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag onder het drainageniveau, krijgt de lens geen bolle vorm aan de onderkant. De slecht doorlatende laag zorgt voor de platte onderkant. Dit komt voor bij zand op klei of bij gerijpte op ongerijpte klei.

#### De **zoetwaterzone**.

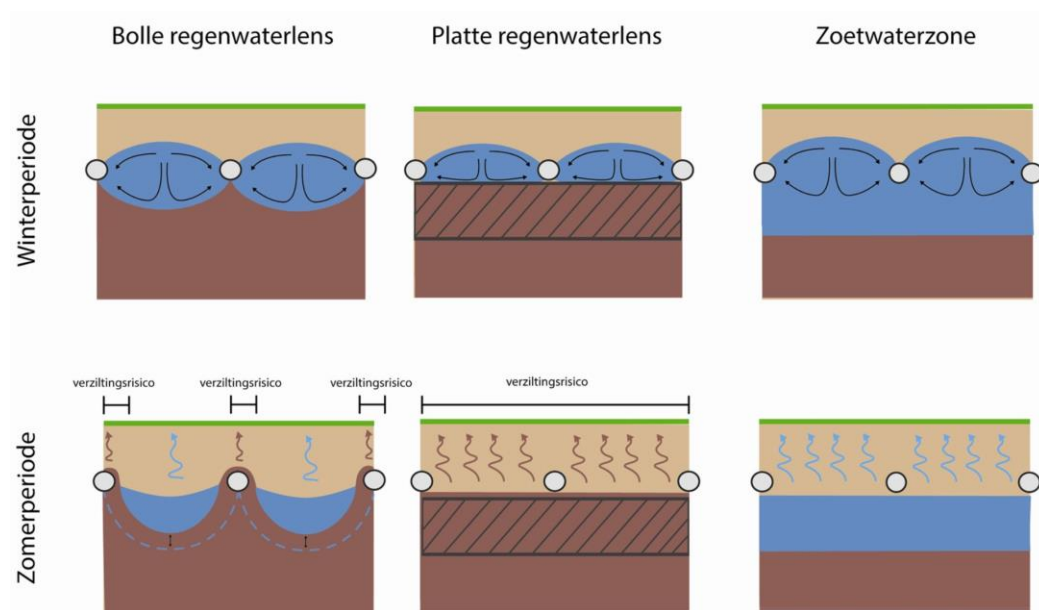
Daar waar de kweldruk beperkt of afwezig is, kan het zoete water tot onder de drainage doordringen. Als de zoet-zoutgrens in het grondwater diep genoeg ligt, wordt het zoute

---

<sup>1</sup> De Vries J.J., 1982. Anderhalve eeuw hydrologisch onderzoek

water niet tot de drains aangetrokken. Zo is het mogelijk dat er een brede zoetwaterlaag blijft bestaan die we de 'zoetwaterzone' noemen.

Onderzoek van Acacia Water heeft aangetoond dat ook een hogere kweldruk leidt tot een aanzienlijke afname van de zoete lenzen <sup>2</sup>.



Figuur 3. Type neerslaglenzen zoals aangetroffen in Nederland

## 2.2 Zoutgehalte van bodemvocht

Tijdens perioden van neerslagtekort en sterke gewasverdamping in voorjaar en zomer kan, bij brak-zout grondwater, vanaf de grondwaterstand door de capillaire werking water tot in de wortelzone optrekken. Tussen de drainagemiddelen stijgt dan vanaf de (dan stagnerende) lenzen zoet water op. Echter ter plaatste van de drains en greppels bevindt zich (soms) water met hoge zoutgehalten dichtbij het freatische vlak (grondwaterspiegel). Dit zout zal dan ook tot in de wortelzone kunnen optrekken. Percelen met zeer dunne lenzen zijn bijzonder gevoelig voor deze doorslag van zout in de wortelzone, omdat de lenzen daar in hun geheel kunnen verdwijnen tijdens droge perioden.

Opstijgen van zout in de onverzadigde zone kan mogelijk effect hebben op de gewasgroei. Het in droge periode opgebouwde verzilte bodemvocht wordt bij buien over het algemeen snel uitgespoeld.

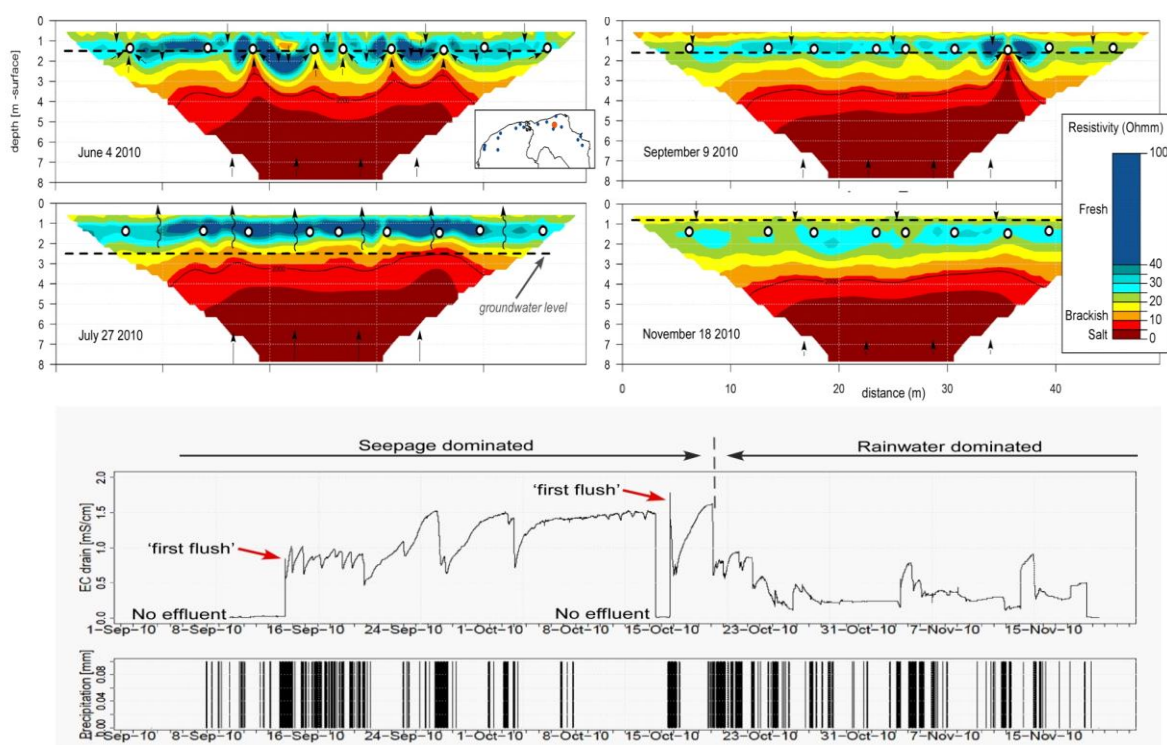
## 2.3 Zoutgehalte van afvoer van drains en greppels

In het verloop van het zoutgehalte van greppels en buisdrainage is duidelijk de werking van de hierboven beschreven zoetwaterlenzen te herkennen. In najaar en winter wateren

<sup>2</sup> Tolk, L. en Velstra, J. 2016. Spaarwater, pilots rendabel en duurzaam agrarisch watergebruik in een verziltende omgeving van de Waddenregio. Hoofdrapport, Acacia Institute

percelen meestal relatief zoet water af. Echter waar 'upconing' van brak grondwater tot in de drainagemiddelen reikt, blijken ontwateringsmiddelen ook in najaar en winter vaak water te produceren met verhoogde zoutgehaltes.

Het naleveren van zout na de zomer is een vrij normaal verschijnsel. Tijdens lange droge perioden met veel verdamping krimpen de zoetwaterlenzen. Wanneer daarna neerslag optreedt en de buisdrains met hun diepe ligging alweer snel gaan lopen dan heeft het water de eerste periode een hoog zoutgehalte. Dit kan enkele weken tot maanden duren. Een voorbeeld waar langdurig metingen zijn uitgevoerd (Figuur 3) laat zien dat dit tot in oktober optreedt en dan pas het zoutgehalte is gaan dalen. De daling komt overeen met een hoge grondwaterstand waardoor waarschijnlijk ook de kweldruk is verminderd.



Figuur 4. Voorbeeld uit Groningen. Het laat het optrekken van zout naar de drainagemiddelen zien in natte perioden. Dit leidt tot afvoer van drainagewater met een verhoogd elektrisch geleidingsvermogen of EC (hoog zoutgehalte) in de zomermaanden en de nazomer. I



## 3 Geofysische meetmethoden

### 3.1 Relaties elektrische weerstand, lithologie en zoutgehaltes

Voor geofysisch onderzoek worden twee typen meetmethoden toegepast die een beeld geven van de elektrische weerstand  $\rho$  van de ondergrond, uitgedrukt in Ohm-m, of de elektrische geleidbaarheid  $\sigma$ , uitgedrukt in mS/m of  $\mu\text{S/cm}$ . Daarbij geldt dat:

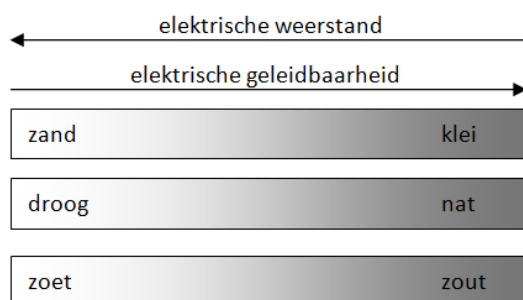
$$1 \text{ Ohm m} = \frac{1}{\text{S/m}} = \frac{1000}{\text{mS/m}} = \frac{10000}{\mu\text{S/cm}}$$

De elektrische weerstand van de ondergrond (ook wel formatieweerstand)  $\rho_f$  wordt bepaald door de weerstand van het grondwater  $\rho_w$ , de lithologie, de mate van waterverzadiging en de temperatuur.

Voor de correctie van een gemeten weerstand bij een temperatuur T in °C naar de weerstand bij een T van 20 °C geldt de volgende relatie:

$$\rho_{f20} = \rho_f \cdot \frac{75}{1.8T + 39}$$

Figuur 5 geeft een indicatie van wat er met een geofysica meting wordt vastgesteld. Voor een juiste interpretatie worden altijd enkele boringen uitgevoerd om mogelijke verkeerde interpretatie te voorkomen. Voor een goede interpretatie van de geofysische metingen moet men dus op de hoogte zijn van de lithologie en de grondwaterstand ter plaatse van de meting. Voor de relatieve veranderingen in de tijd (monitoring) zijn geofysische metingen in ieder geval geschikt.



Figuur 5. Hoge weerstanden worden gerelateerd aan zand en/of zoet water, lage aan klei en/of zout.

Voor de weerstand van verzadigde grond en de weerstand van het grondwater geldt de relatie van Archie (1942):

$$\rho_w = \frac{\rho_f}{F}$$

Waarbij F de formatiefactor is. De formatiefactor van waterverzadigde klei ligt die in de orde grootte van 1 à 2, terwijl deze voor verzadigd zand varieert van 2.5 voor fijn zand tot 5

voor grof zand en grind. In de onverzadigde zone, met name van zandbodems, is de formatiefactor hoger.

Tabel 1. Formatiefactor voor diverse bodemsoorten

Lithologische beschrijving	Formatiefactor
grind met zand	7
grof zand met grind	6
grof zand	5
matig grof zand	4
zwak slib houdend zand	3
matig slib houdend zand	2.5 *
sterk slib houdend zand	2 *
klei	1 - 3 *
veen	~ 1

De elektrische weerstand of de elektrische geleidbaarheid (EC) van water is gerelateerd aan het aantal opgeloste ionen oftewel het zoutgehalte. Uit de metingen is door DLO (Mulder & Spoelstra, 1995) een relatie opgesteld tussen de elektrische geleidbaarheid  $\sigma_{w20}$  de (EC bij 20 °C) en het zoutgehalte van het water uitgedrukt in chlorideconcentratie in mg/l (Cl) op basis van alle analyses in dit gebied. Deze geldt alleen voor EC-waarden hoger dan 1000  $\mu\text{S/cm}$ .

$$\text{Cl} = 3.9831 * \sigma_{w20} - 256.4$$

Een andere relatie is die van Stuyfzand (1987), waarin ook het bicarbonaatgehalte  $\text{HCO}_3$  en sulfaat ( $\text{SO}_4$ ) in mg/l wordt meegenomen. Deze gaat op voor EC-waarden hoger dan 800  $\mu\text{S/cm}$ .

In de praktijk is de geleidbaarheid van water toch de meest praktische en direct meetbare parameter (EC-meting). Voor dit onderzoek definiëren we de verschillende zoutklassen als volgt: de bovengrenzen van zoet, lichtbrak, brak en zout zijn respectievelijk 1000  $\mu\text{S/cm}$  (Cl = 150 mg/l), 4000  $\mu\text{S/cm}$  (Cl = 1500 mg/l), 15000  $\mu\text{S/cm}$  (Cl = 6000 mg/l) en 50000  $\mu\text{S/cm}$  (Cl = 20000 mg/l).

Tabel 2. Verhouding van Chloride gehalten en geleidbaarheid van grondwater tot weerstanden

Water type	Chloride [mg/l]	Geleidbaarheid water [ $\mu\text{S/cm}$ ]	Weerstand [Ohm m]	Weerstand zand [Ohm m]	Weerstand klei [Ohm m]
<b>Zoet</b>	<150	<1.000	>10	>30 – 50	>10 – 30
<b>Licht Brak</b>	1.500	4.000	2,5	7,5 – 17,5	2,5 – 7,5
<b>Brak</b>	6.000	15.000	0,67	2 – 4,7	0,67 – 2
<b>Zeewater</b>	20.000	50.000	0,2	0,6 – 1,4	0,2 – 0,6

## 3.2 Geofysische methoden

Voor deze rapportage zijn twee methoden van belang, namelijk de FDEM (DUALEM) en de CVES of ERT-methode. Over het algemeen is de DUALEM-methode geschikt om

binnen korte tijd meerdere profielen uit te voeren, maar dit gaat ten koste van de resolutie van de resultaten. Aan de andere kant biedt de CVES of ERT-methode een hoge resolutie, maar vereist het meer tijd voor de metingen.

#### FDEM profilering(DUALEM)

Met de Frequency Domain Elektromagnetische (FDEM) methode worden elektrische stromen in de ondergrond opgewekt door inductie van een wisselend elektromagnetisch veld, uitgezonden door een zenderspoel. Het opgewekte secundaire elektromagnetische veld wordt opgevangen door een ontvangerspoel. Uit het laatste signaal kan de schijnbare weerstand van de ondergrond worden verkregen. Door 3 frequenties en 2 spoelstanden te combineren worden schijnbare weerstanden tot 6 verschillende diepten gemeten. Uit deze waarden kan door inversie een 2D beeld van de ondergrond worden verkregen tot een diepte van ca. 6 m. De spoelen zijn bevestigd aan een enkele buis, waarmee al lopend kan worden gemeten. Na interpretatie wordt dan een continu 2D beeld verkregen van de weerstand van de ondergrond. Voor de metingen is gebruik gemaakt van de DUALEM-421S.



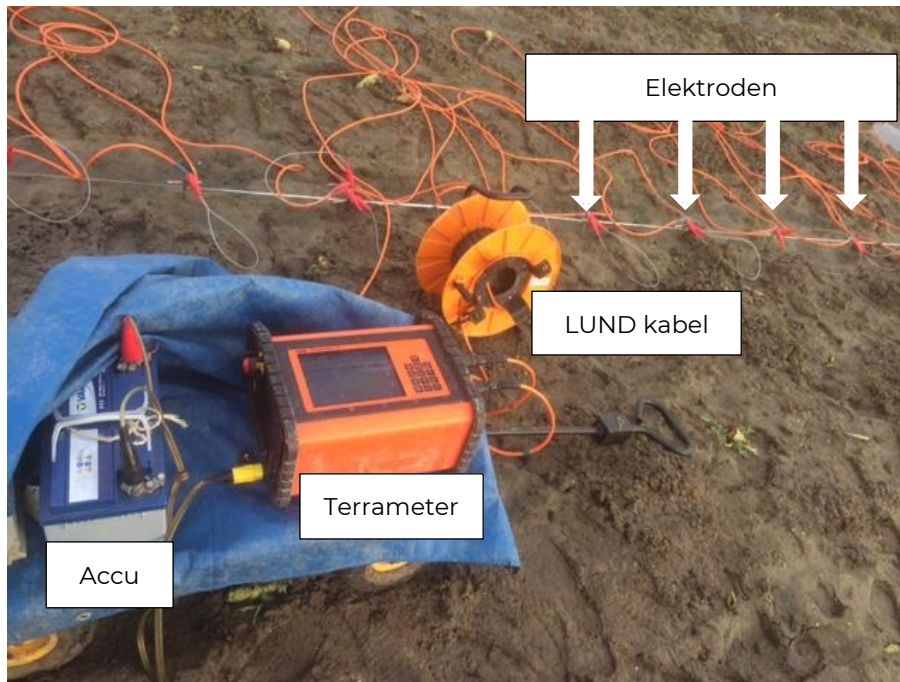
Figuur 6. FDEM (DUALEM) meting

#### CVES of ERT-methode

De CVES of ERT (Electrical Resistivity Tomography) methode is een zogenaamde Direct Current methode. Hierbij wordt via twee stroomelektroden een elektrische stroom opgewekt in de ondergrond.

Uit die stroom en het geïnduceerde potentiaalverschil in twee andere elektroden kan dan de schijnbare weerstand worden berekend. De schijnbare weerstand is een soort gemiddelde waarde van de ondergrond tot een bepaalde diepte, welke afhankelijk is van de afstand van de stroomelektroden. Bij de CVES-methode worden langs een profiel een

groot aantal elektroden geplaatst en worden de schijnbare weerstanden bij tal van combinaties van elektroden bepaald. Door inversie van deze waarden te bepalen door een rekenmodel kunnen de werkelijke of de formatieweerstanden van de ondergrond worden bepaald en getoond in een 2D beeld.



Figuur 7. CVES-meting met terrameter, accu, LUND-kabel en elektroden

De metingen zijn uitgevoerd met een Terrameter en de LUND kabel van ABEM. In totaal kunnen met dit systeem voor elke meting 64 elektroden geplaatst worden op afstanden variërend van 0.5 tot 10 m. De totale lengtes kunnen hierdoor variëren van 40 tot 400 m. Het diepte bereik is ongeveer een 1/6 van de lengte van de CVES. Door de afstanden te vergroten wordt de resolutie verlaagd, maar de gemeten diepte dus ook vergroot.

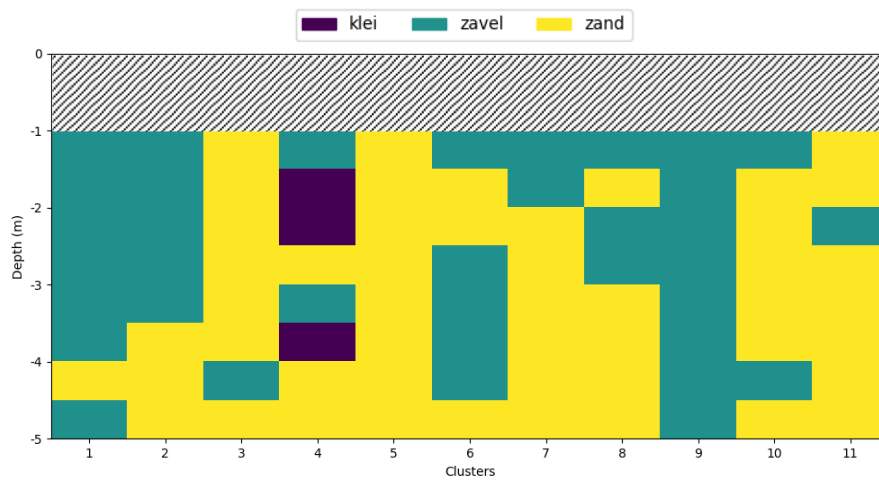
### 3.3 Uitvoering

De metingen zijn uitgevoerd aan het eind van de winter in februari/maart 2023. Dit betekent dat op het moment van meten de zoetwatervoorraad min of meer tot het maximale niveau was aangevuld.

Uitgevoerd zijn:

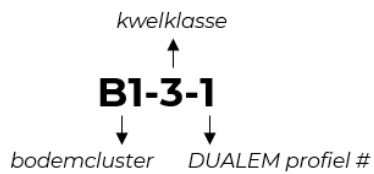
- 70 DUALEM-profielen op 23 locaties, met circa 3 profielen per locatie waarvan in de meeste gevallen 2 loodrecht op de drains.
- 2 CVES-profielen op interessante locaties in het gebied om extra detailinformatie over de zoet-zout opbouw te verkrijgen.

De locaties van de metingen zijn vooraf vastgesteld door middel van een clusteringsanalyse. Deze analyse heeft als doel gehad om een aantal standaardprofielen te definiëren. Voor elk perceel langs het beoogde tracé is tijdens deze analyse een passend standaardprofiel toegewezen, dat het meest representatief is voor de bodemopbouw en kwelsituatie van dat specifieke perceel. De hydrologische standaardprofielen, in totaal 27, zijn gebaseerd op bodemgegevens uit GeoTop en drie verschillende kwelkaarten: MIPWA, LHM en de Acacia Water kwelkaart. Figuur 8 toont de bodemopbouw per bodemcluster.



Figuur 8. Bodemopbouw per cluster o.b.v. GeoTop. De eerste meter onder maaiveld is niet meegenomen gezien deze minder bepalend is voor de vorming van de zoetwaterlens.

Aan de 11 unieke bodemclusters zijn drie kwelklassen (1 t/m 3, waarbij 1 staat voor lage kwel en 3 voor hoge kwel) toegevoegd om zo tot 27 unieke standaardprofielen te komen. Het streven was om uiteindelijk een meting uit te voeren op ieder standaardprofiel, om zo de diversiteit in bodem en kwel langs het tracé te dekken. De codes van de DUALEM-profielen geven aan tot welk standaardprofiel het perceel behoort waar de meting is uitgevoerd:



## 4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten gepresenteerd en kort toegelicht. Tabel 3 geeft een overzicht van de resultaten. In sectie 4.1 worden de resultaten stuk voor stuk toegelicht.

Tabel 3. Overzicht van de resultaten van de metingen. Voor de interpretatie van de resultaten is het zoet-zout grensvlak gedefinieerd als 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Cl = 1500 mg/l).

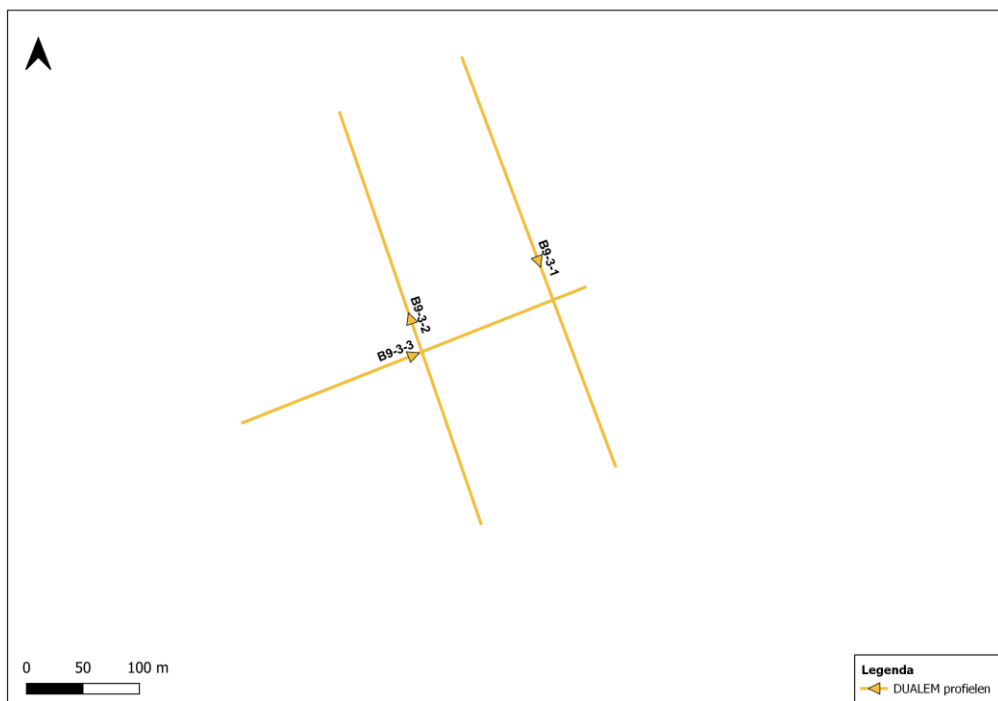
Cluster	Diepte zoet-zout (m -mv)	Toelichting
<b>B1-1</b>	2.5 - 3.0	O.b.v. het bodemtype en de gemeten weerstanden lijkt het grondwater lichtbrak te zijn vanaf een diepte van 2.5-3 m. Naar het zuidwesten van het perceel is het grondwater vanaf 4 m brak
<b>B1-2</b>	>6	In de lager gelegen zuidwestelijke hoek ligt het grensvlak op 2.0-2.5 m daarna zakt het uit tot onder het meetbereik (>6 m)
<b>B1-3</b>	>6	Alleen langs de waterlopen ligt het grensvlak op 2.0-2.5 m diepte, op de rest van het perceel ligt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B2-0</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt
<b>B2-1</b>	2.0 - 2.5	Sterke variatie binnen het perceel. Aan de noordkant ligt het grensvlak >6 m diep, aan de zuidkant reikt het brakke grondwater tot 2m diepte.
<b>B2-3</b>	2.0 - 2.5	Alleen de oost kant van het perceel heeft een ondiep grensvlak. Op het overgebleven gedeelte ligt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B3-1</b>	2.0 - 3.0	Sterke variatie binnen het perceel. Voornamelijk aan de noord- en oostkant van het perceel is het grondwater brak. In het zuiden ligt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B3-3</b>	2.0 - 4.0	Variatie binnen het perceel. Het grensvlak ligt op 2.0 m bij de zuidelijke waterloop, zakt uit tot 4 m op 50m afstand van de waterloop, en ligt daarna buiten meetbereik (>6 m)
<b>B4-1</b>	>6	Brak grondwater alleen aanwezig in de noordoostelijke hoek, op circa 2.5 m diepte
<b>B4-3</b>	>6	Brak grondwater alleen aanwezig in de noordoostelijke hoek, op circa 2.5 m diepte
<b>B5-1</b>	1.5 - 2.5	Brak grondwater op vrijwel het hele perceel. De ligging van de drainage en de zoetwaterlenzen zijn duidelijk terug te zien in de metingen.
<b>B5-2</b>	1.5 - 2.5	Gemeten weerstanden op dit perceel zijn laag. Op het noordwestelijke deel van het perceel bevindt het grensvlak zich vermoedelijk op een diepte van 1.5-2 m. In oostelijke richting zakt het grensvlak iets dieper naar ongeveer 2-2.5 m.
<b>B5-3</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt

<b>B6-1</b>	1.5 - 2.0	Gemeten weerstanden over het algemeen laag, wat duidt op een ondiepe ligging van het grensvlak (1.5-2 m). In het noorden, bij de zeedijk, stijgt de weerstand sterk op 6 m diepte. Deze weerstandstoename duidt op de lokale aanwezigheid van lichtbrak tot zoet grondwater op 6 m diepte.
<b>B6-3</b>	1.0 - 3	Dicht langs de zuidelijke watergang ligt het grensvlak erg ondiep (1 m), verder het perceel in naar het noordwesten, zakt het naar ca. 3m diepte. Aan de noordoost kant, zakt het brakke grondwater verder weg en is het vermoedelijk lichtbrak.
<b>B7-1</b>	2.0 - 3	Lichtbrak tot brak grondwater. De diepte van het zoet-zout grensvlak wordt o.b.v. de metingen geschat op 2-3 m. Aan de westkant van het perceel is het zoutgehalte waarschijnlijk hoger dan aan de oostkant.
<b>B7-3</b>	1.5 - 3	Sterke variatie binnen het perceel. Brak grondwater aan de westelijke en zuidelijke zijde van het perceel, oostelijk zakt het grensvlak abrupt af buiten het meetbereik (> 6m)
<b>B8-1</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt
<b>B9-2</b>	1.0 – 2.0	Grensvlak erg ondiep aan de zuid- en oostkant van het perceel. Aan de noordwestzijde zakt het grensvlak buiten meetbereik (>6 m)
<b>B9-3</b>	1.0 – 1.5	Gemeten weerstanden extreem laag. Grensvlak erg ondiep op 1-1.5 m over het hele perceel. Invloed van de drainage terug te zien in metingen.
<b>B10-1</b>	2.0 - 2.5	Grensvlak het ondiepst (<2 m) aan de zuidkant van het perceel. Naar het noordoosten, nemen de weerstanden iets toe, wat naar verwachting samengaat met een afname van het zoutgehalte en een overgang van brak naar lichtbrak grondwater.
<b>B10-3</b>	2.5 - 4.0	Zuidelijk deel van het perceel zoet tot lichtbrak, noordelijk (midden van het perceel) wordt het brak
<b>B11-2</b>	>6	Weerstanden zijn dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt
<b>B11-3</b>	2.0 - 2.5	De scherpe overgang in weerstand laat zien dat het zoet-zoutgrensvlak hier tussen de 2-2.5 m diepte ligt. Invloed van de drainage terug te zien in metingen.



## 4.1 Interpretatie van de metingen

B9-3

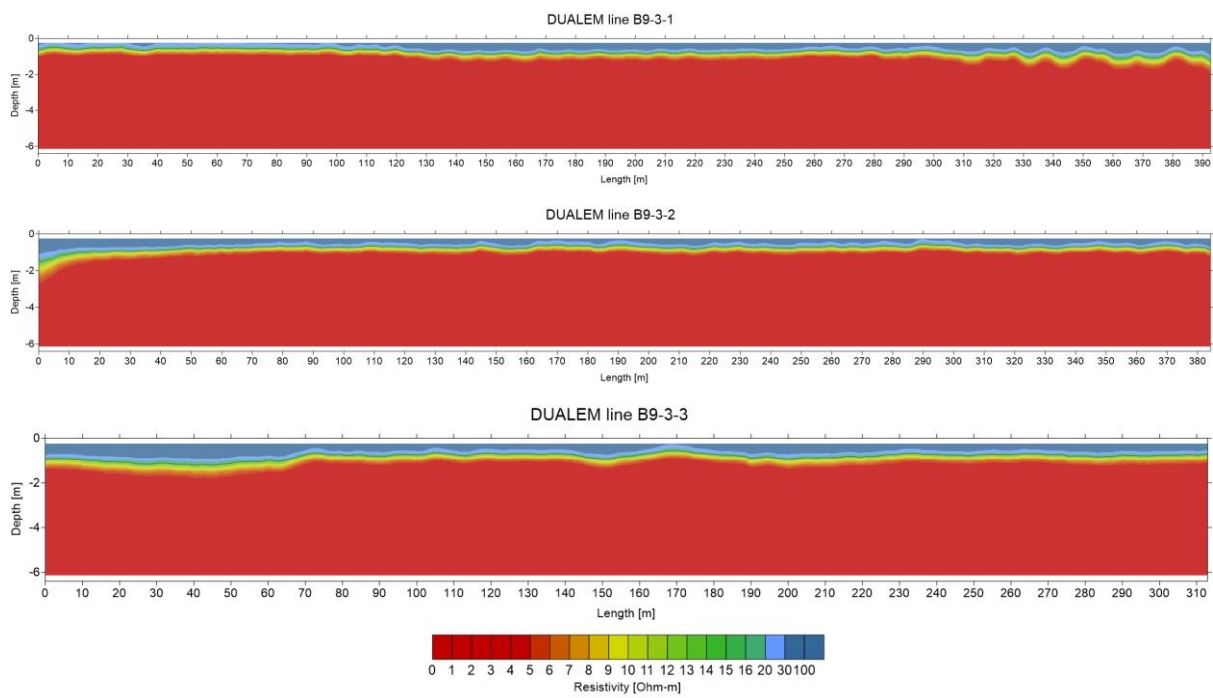


Figuur 9. Meetlocaties voor cluster B9-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Op Locatie B9-3 zijn drie DUALEM-profielen gelopen, zoals te zien in Figuur 9. De drainage watert af op het noordoosten, wat betekent dat er twee profielen (B9-3-1 en B9-3-2) haaks op de drains zijn gelopen. Volgens de bodemclustering is de bodem homogeen, bestaande uit zavel tot 5m diepte (Figuur 8). Figuur 10, laat de resultaten van de DUALEM metingen zien.

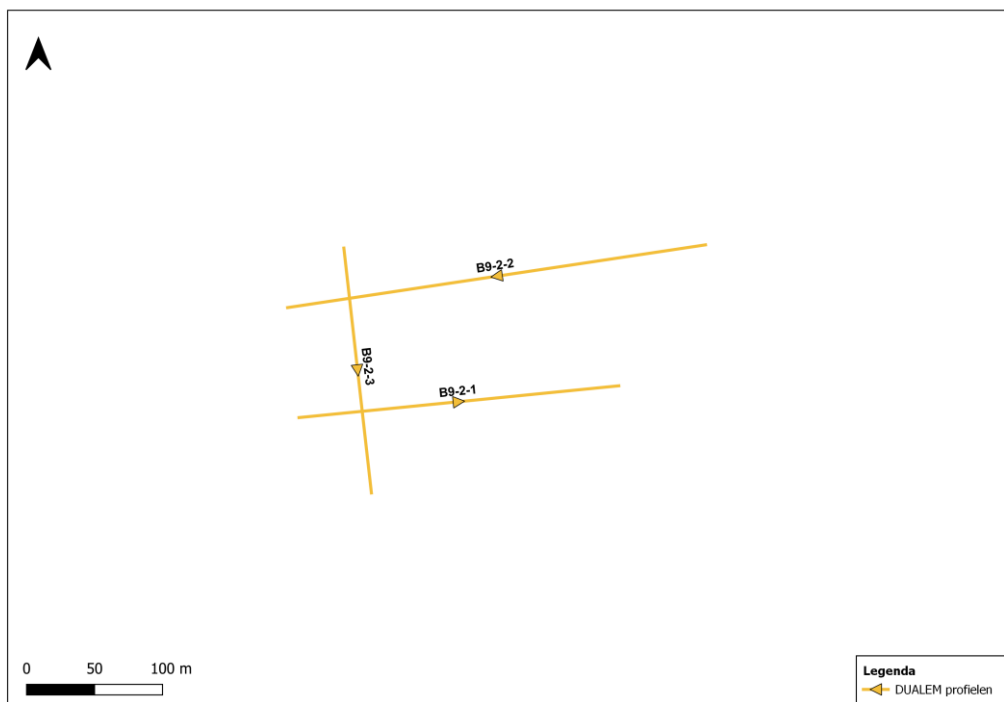
Zoals weergegeven, heeft alleen de bovenste 1-1.5 meter een hoge weerstand, wat betekent dat alleen dit deel zoet is, of de grondwater spiegel lager staat. Vanaf 1-1.5 m is een scherpe overgang te zien naar een extreem lage weerstand (< 5 Ohm m), wat duidt op een overgang naar brak grondwater. De uitgevoerde handmetingen van Antea (2023) bevestigen dit hoge zoutgehalte, met gemeten waarden van 16 mS/cm en >20 mS/cm op respectievelijke dieptes van ±2 en 5.5 m onder maaiveld. De diepteligging van het zoet-zout grensvlak neemt iets toe in zuidelijke richting.

In de resultaten van profiel B9-3-1 lijkt op sommige plekken de invloed van de drainage terug te zien. Dit betekent dat er hoogstwaarschijnlijk zoetwaterlenzen aanwezig zijn binnen dit perceel.



Figuur 10. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B9-3.

## B9-2

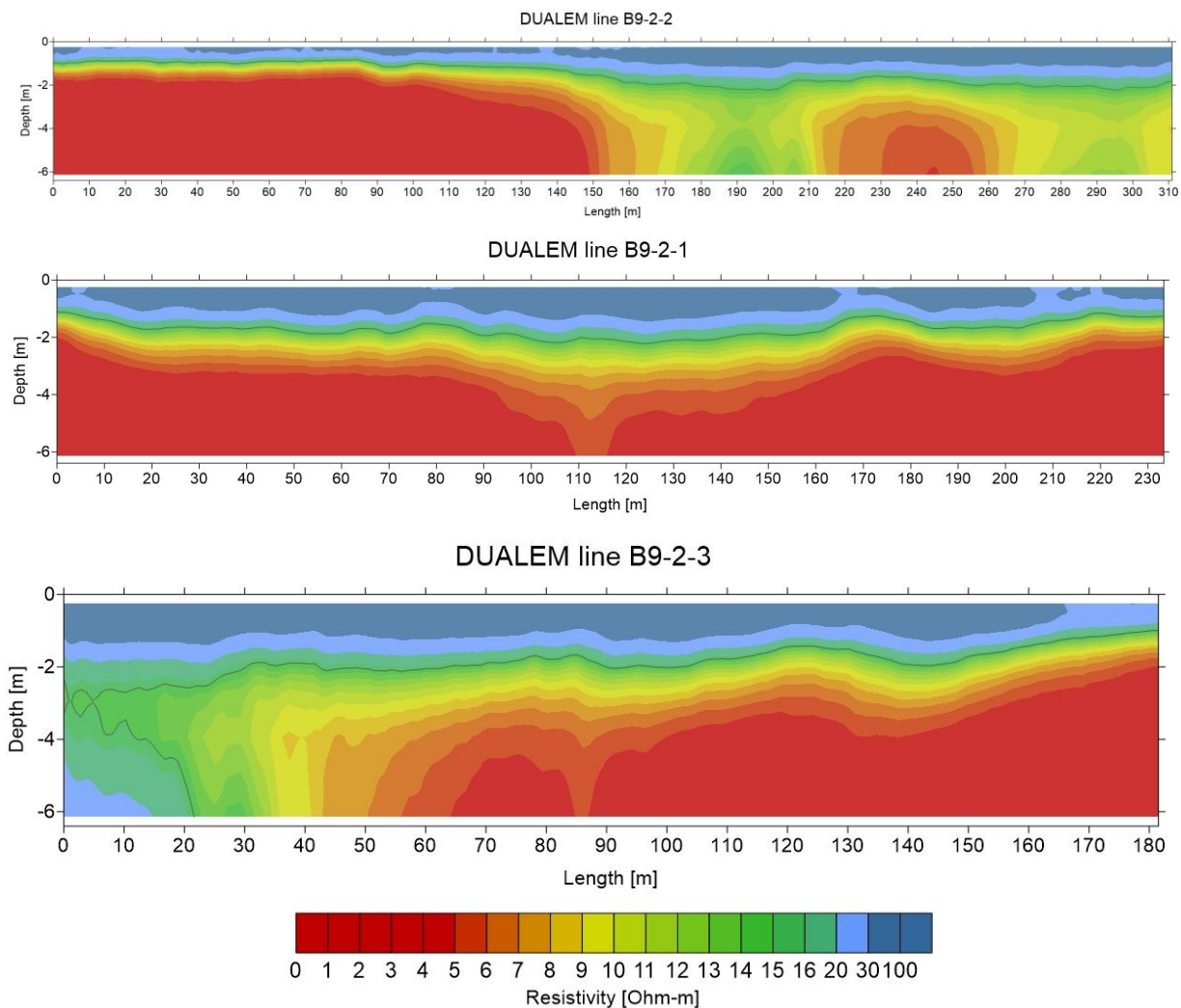


Figuur 11. Meetlocaties voor cluster B9-2. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

De bodemopbouw op locatie B9-2 is vergelijkbaar met de vorige locatie, met een homogeen zavelprofiel, en de drainage loopt in oostelijke richting (Figuur 8). Er zijn in totaal drie DUALEM-profielen uitgevoerd, waarvan profiel B9-2-3 loodrecht op de drainage loopt (Figuur 10). De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Figuur 10.

De diepte van het zoet-zout grensvlak varieert binnen het perceel. Zoals de resultaten laten zien, begint de laag met lage weerstand (minder dan 5 Ohm m) al op een diepte van ongeveer 1-1.5 meter aan de oost- en zuidkant van het perceel, wat wijst op een ondiepe ligging van het zoet-zout grensvlak precies op de beoogde locatie van het tracé. De uitgevoerde EC-metingen (Antea, april 2023) laten ook zien dat het grondwater in het zuidelijke deel een hoog zoutgehalte heeft. Op een diepte van 2.4 meter en 5.5 meter zijn respectievelijk EC-waarden van 3 mS/cm en > 20 mS/cm gemeten.

Aan de noordwestkant van het perceel daalt het zoutgehalte en is het grondwater vermoedelijk zoet. In de resultaten van profiel B9-2-2 neemt de weerstand op twee plaatsen toe, wat mogelijk kan worden veroorzaakt door een overgang naar zoeter grondwater en/of een zandiger bodem.



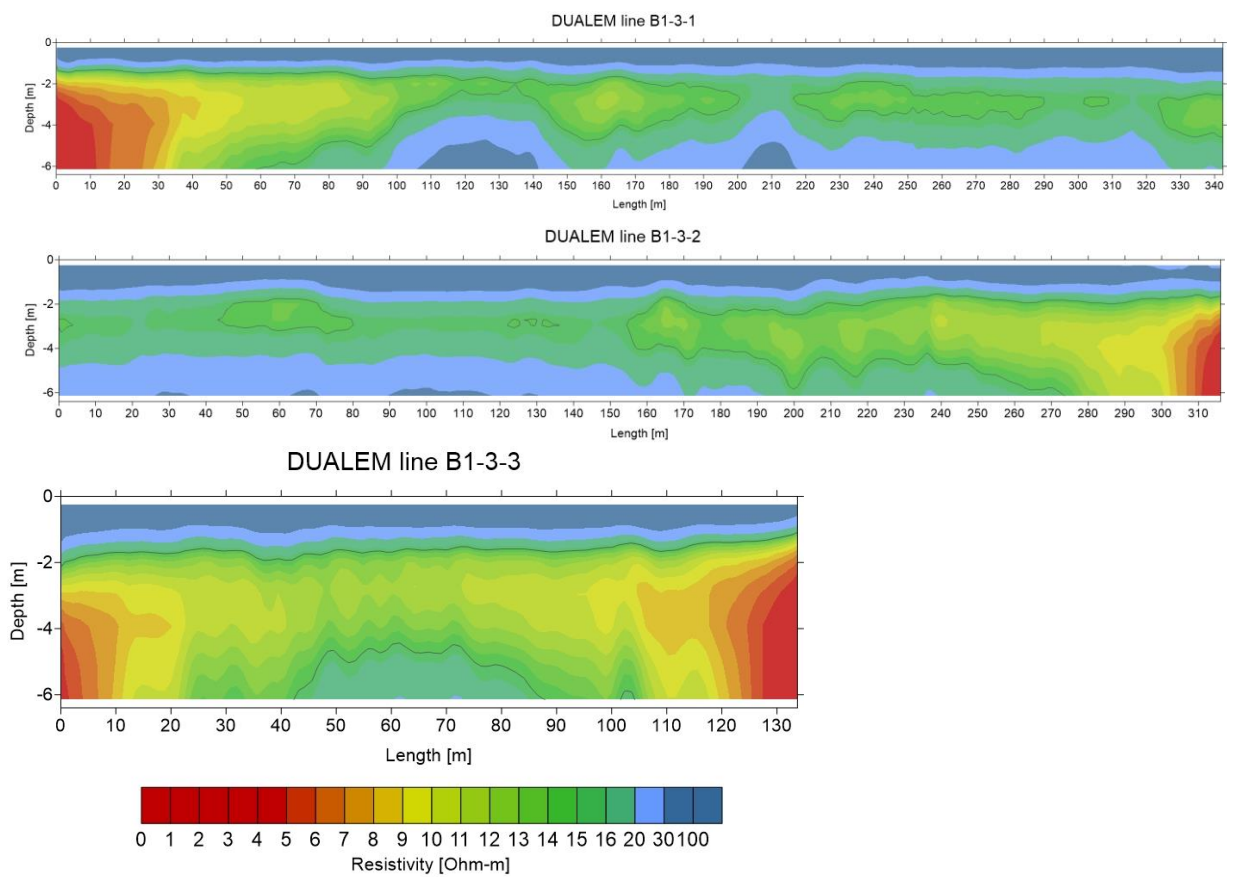
Figuur 12. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B9-2.

## B1-3



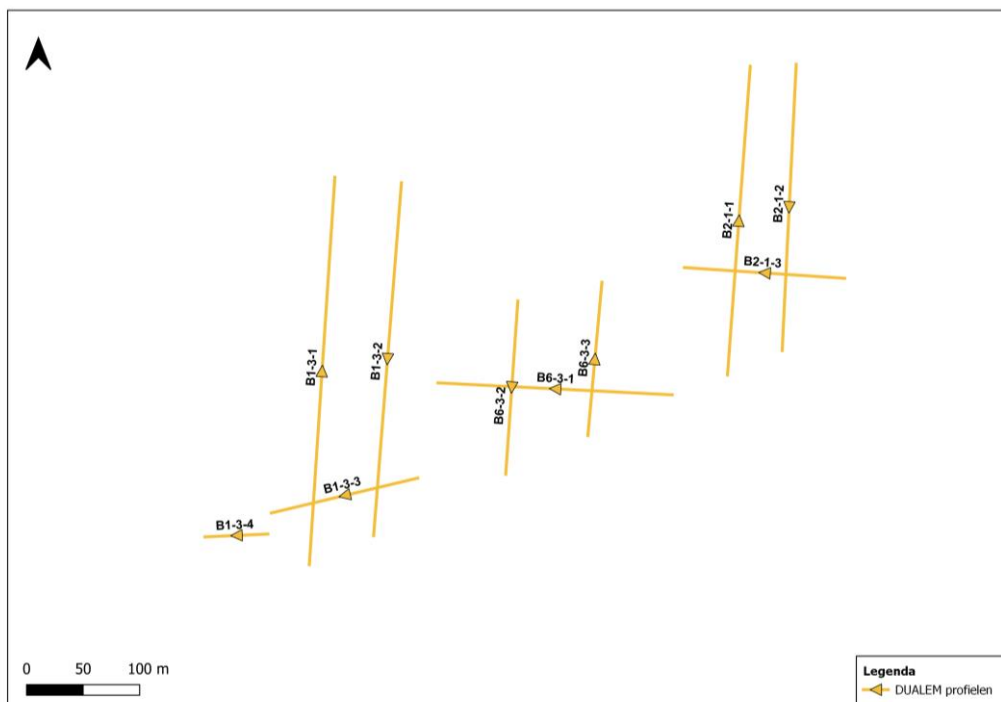
Figuur 13. Meetlocaties voor cluster B1-3 (linker perceel). De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

De bodem op locatie B1-3 bestaat uit zavel met een zandlaag op 4 m diepte (Figuur 8). Op locatie B1-3 zijn wederom drie profielen gelopen, de resultaten zijn weergegeven in Figuur 12. Wat opvalt bij deze profielen is dat op sommige plekken de weerstand weer toeneemt op grotere diepte. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van de zandlaag. Het zout komt alleen omhoog (tot circa 2.0-2.5 m) aan de randen van het perceel langs de watergangen, waar weerstanden < 5 Ohm m gemeten zijn. Binnen het perceel lijkt het grondwater zoet tot lichtbrak (zuidkant) te zijn.



Figuur 15. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B1-3.

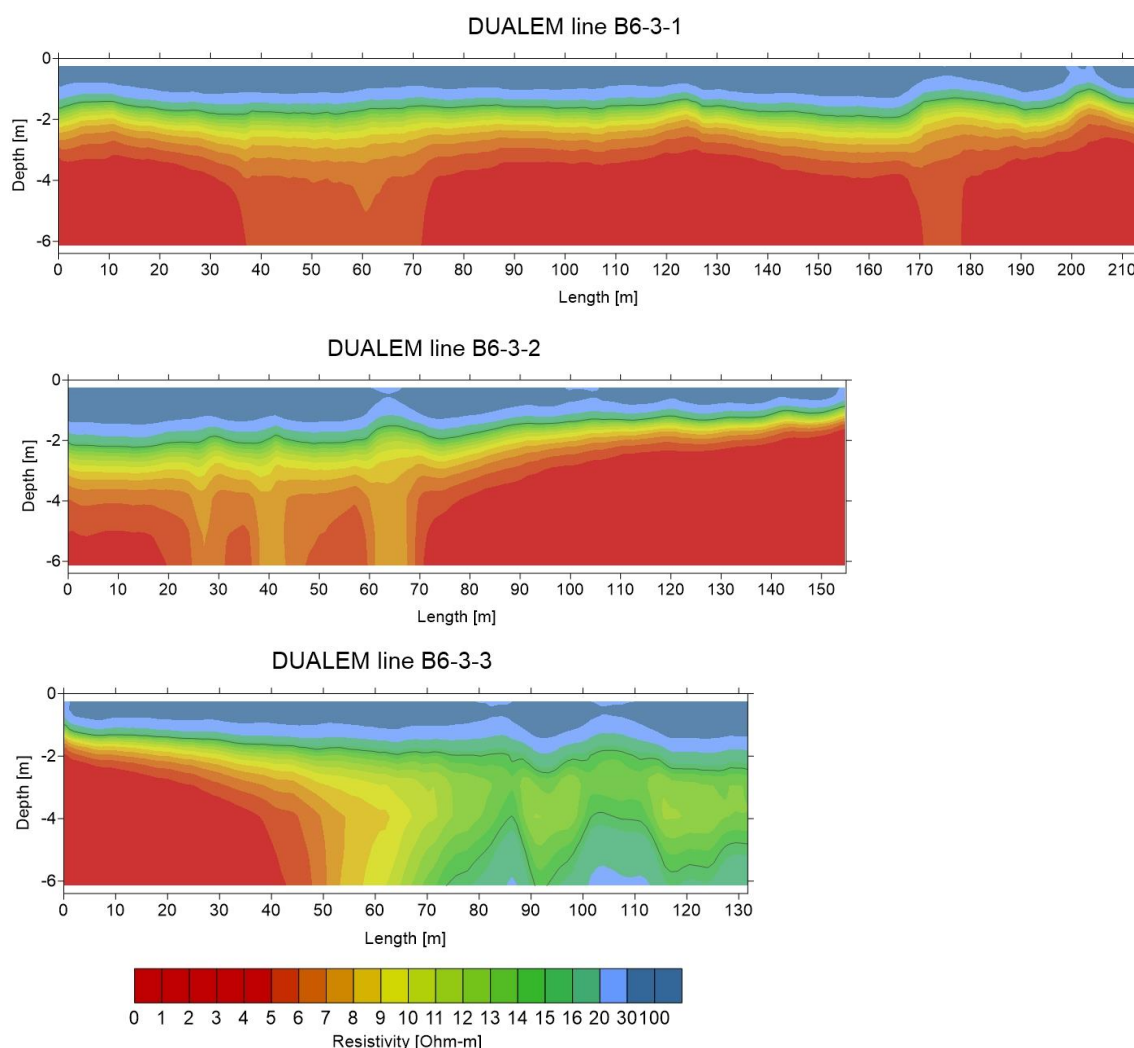
### B6-3



Figuur 14. Meetlocaties voor cluster B1-3 (middelste perceel). De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

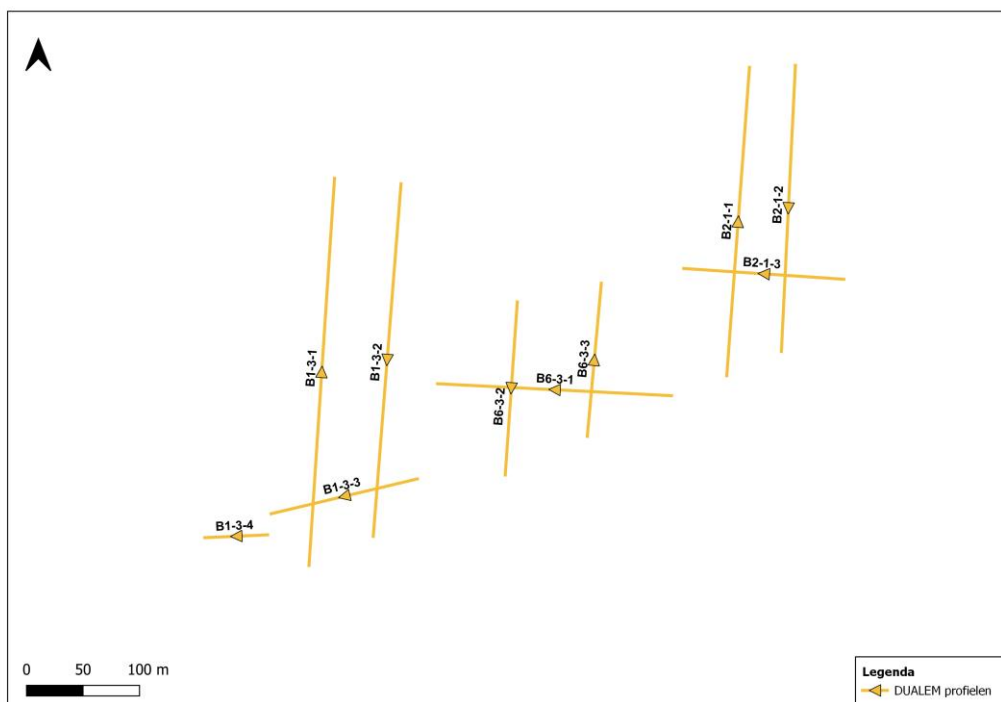
Locatie B6-3 is toebedeeld aan bodemcluster 6, gekenmerkt door een gelaagd zavel-zand profiel (Figuur 8). De drainage loopt van oost naar west. In totaal zijn er drie profielen gelopen, waarvan twee haaks op de drainage (B6-3-2 en B6-3-3) en één parallel aan de drainage (B6-3-1). Figuur 15 laat de DUALEM resultaten zien.

Over het algemeen is de weerstand hier lager vergeleken met het aangrenzende perceel B1-3. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door een hoger zoutgehalte van het grondwater. De diepte van het grensvlak varieert tussen ongeveer 1-3 m onder maaiveld. Ook hier komt het zout het meest omhoog langs de zuidelijke watergang tot een diepte van 1-1.5 m beneden maaiveld. Verder het perceel in, aan de noordoost kant, zakt het zout weg en neemt de weerstand toe (B6-3-3). Hier is ook de gelaagdheid van de bodem terug te zien in de meting, met een verloop van een lagere weerstand naar een hogere weerstand op grotere diepte. Het grondwater op dit deel van het perceel is naar verwachting lichtbrak. Aan de noordwest kant van het perceel wordt de diepte van het zoet-zoutgrensvlak geschat op grofweg 3 m onder maaiveld.



Figuur 16. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B6-3.

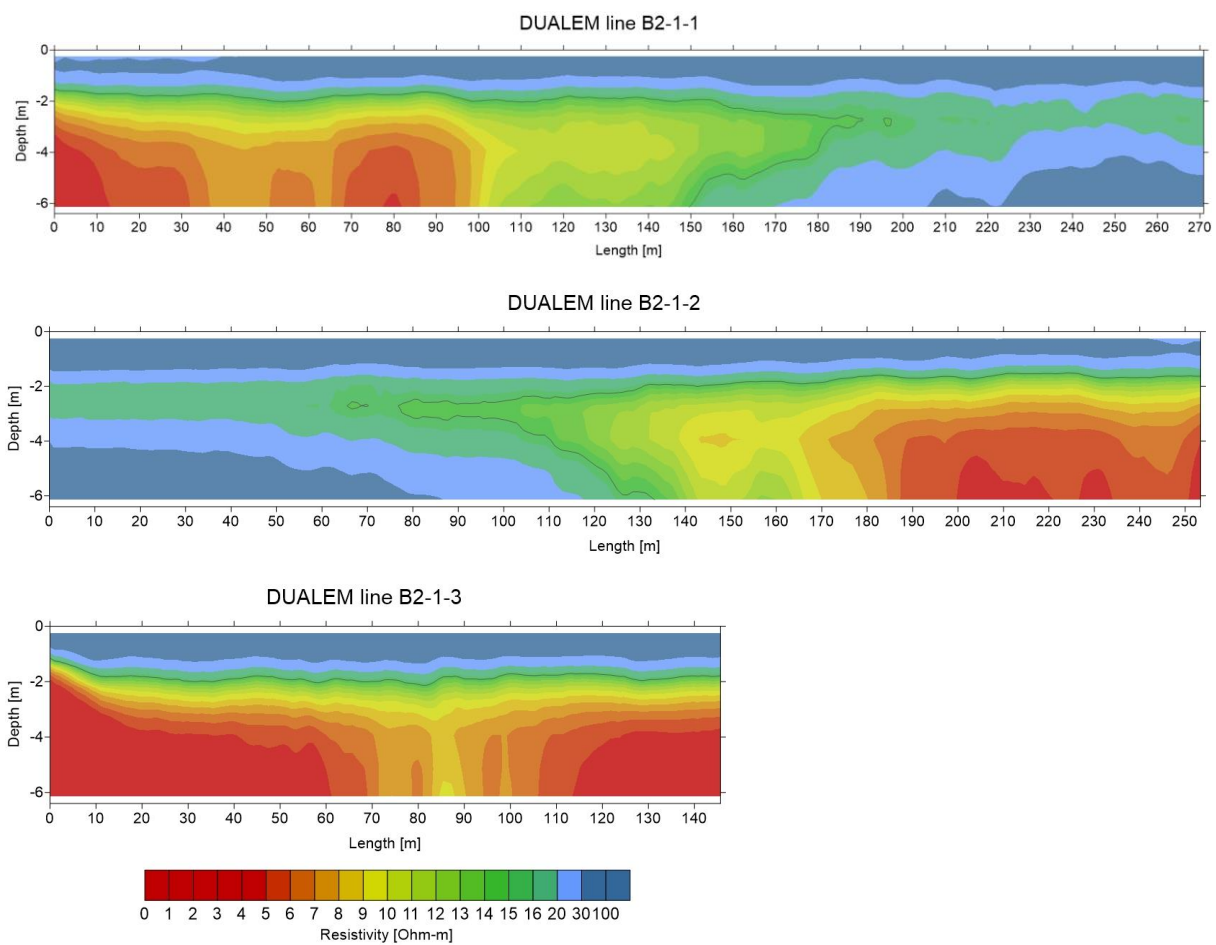
## B2-1



Figuur 17. Meetlocaties voor cluster B2-1 (rechter perceel). De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

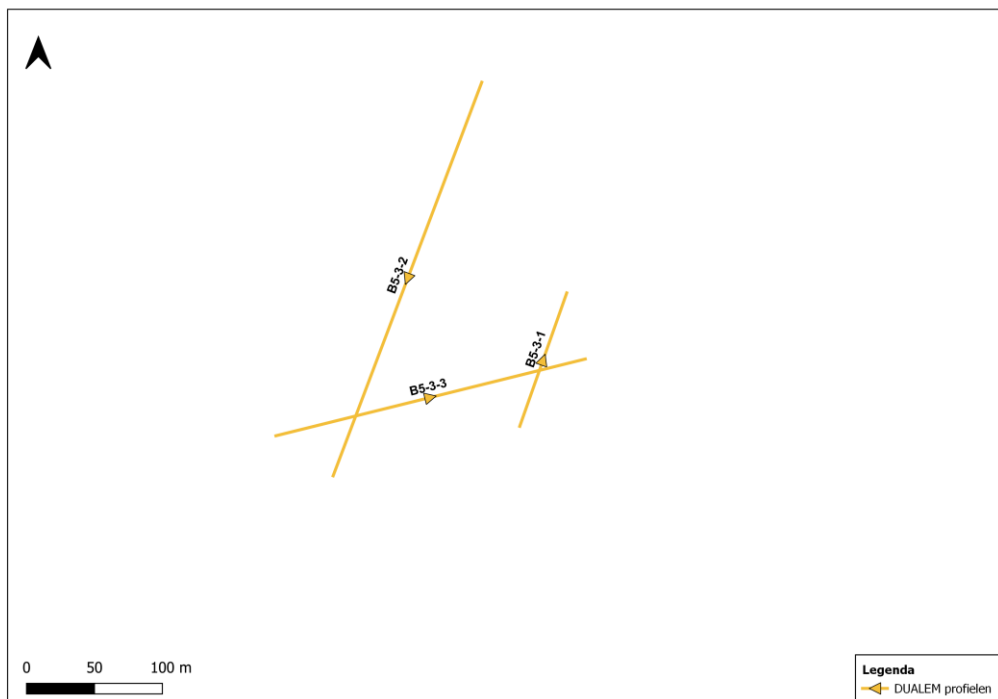
Locatie B2-1 valt onder bodemcluster 2 dat gekenmerkt wordt door een zavel op zand profiel (Figuur 8). De drainage loopt naar het oosten. Dit betekent dat er van de in totaal drie profielen, twee haaks op de drains zijn gelopen (B2-1-1 en B2-1-2). De resultaten laten zien dat, ook hier, de zuidkant van het perceel het zoutst is. Aan de zuidoost kant van het perceel rijkt het zout tot boven de 2 m onder maaiveld. Op de rest van het zuidelijke deel van het perceel wordt de diepte van het zoet-zout grensvlak geschat op ongeveer 2-2.5 m. Naar de noordkant van het perceel neemt de weerstand toe tot >30 Ohm m op 4 tot 6 m diepte. Dit houdt in dat er hier een zoetwaterzone van >6m diep zit. Tussen ca. 1.5 en 4 m diepte neemt de weerstand wat af, hoogstwaarschijnlijk door de aanwezigheid van zavel





Figuur 18. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B2-1.

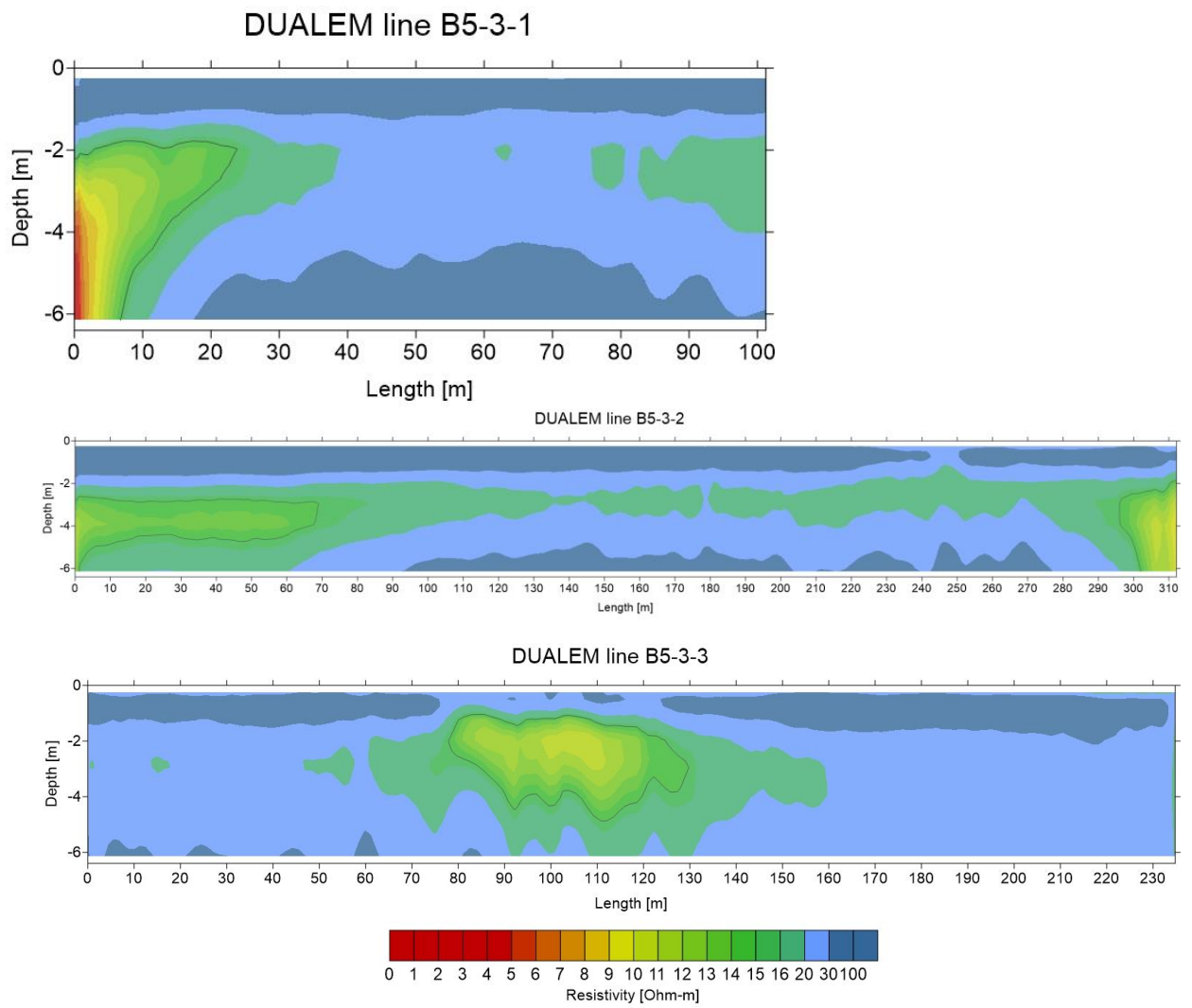
## B5-3



Figuur 19. Meetlocaties voor cluster B5-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

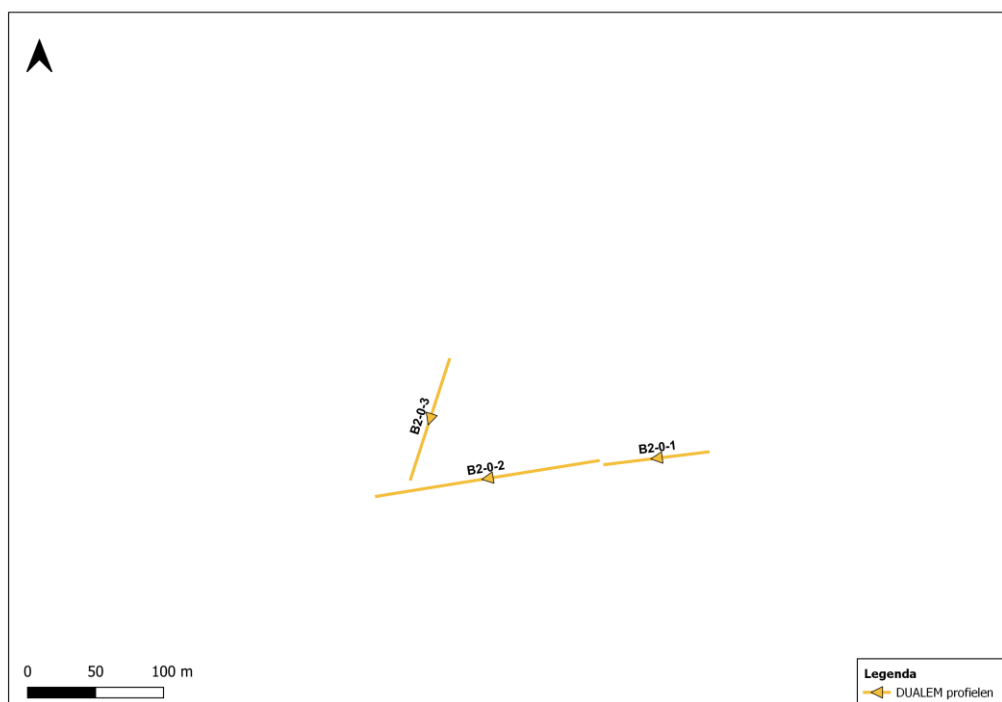
Volgens de bodemclustering en de GeoTop-gegevens bestaat de bodemopbouw op locatie B5-3 uit homogeen zand tot een diepte van 5 m (Figuur 8). De drainage loopt in westelijke richting, dus profiel B5-3-1 en profiel B5-3-2 zijn loodrecht op de drainagemiddelen uitgevoerd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 18.

Over het algemeen is de gemeten weerstand relatief hoog vanwege het zandige karakter van de bodem. De hoge weerstand ( $> 20 \text{ Ohm m}$ ) duidt er ook op dat het grondwater hier zoet is. De handmatige metingen uitgevoerd door Antea (april 2023) bevestigen ook een laag zoutgehalte, met EC-waarden van respectievelijk 0.8 en 1.1 mS/cm op 2 m en 5.5 m diepte. Er lijkt echter sprake te zijn van een niet volledig homogene bodemsamenstelling. In profiel B5-3-3 is er duidelijk een lagere weerstand in het midden van het profiel, wat waarschijnlijk wordt veroorzaakt door een toename in kleigehalte op dat specifieke deel. Verder is in de buurt van de zuidelijke watergang het zout wel waarneembaar op grotere diepte (profiel B5-3-1).



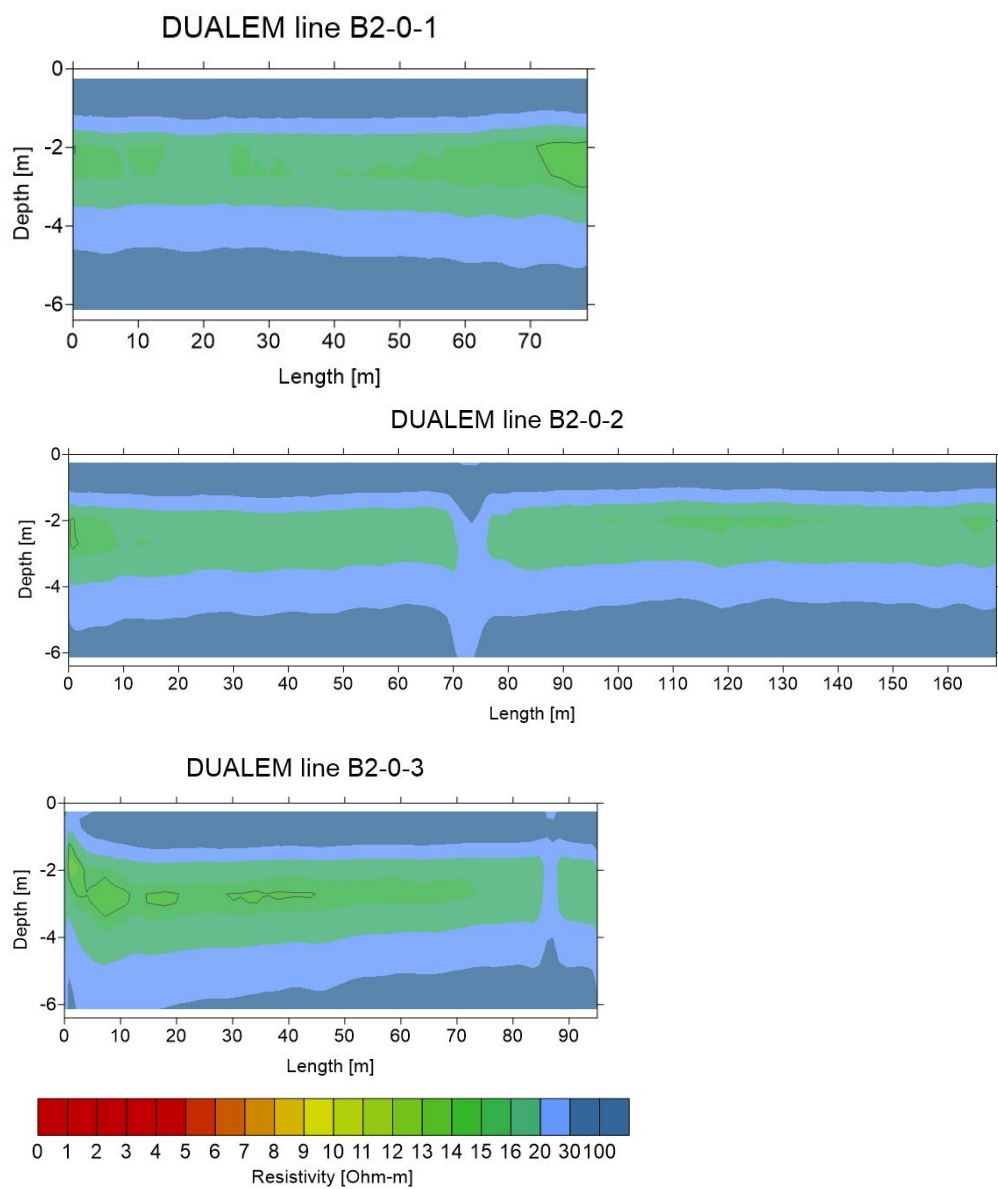
Figuur 20. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B5-3.

## B2-0



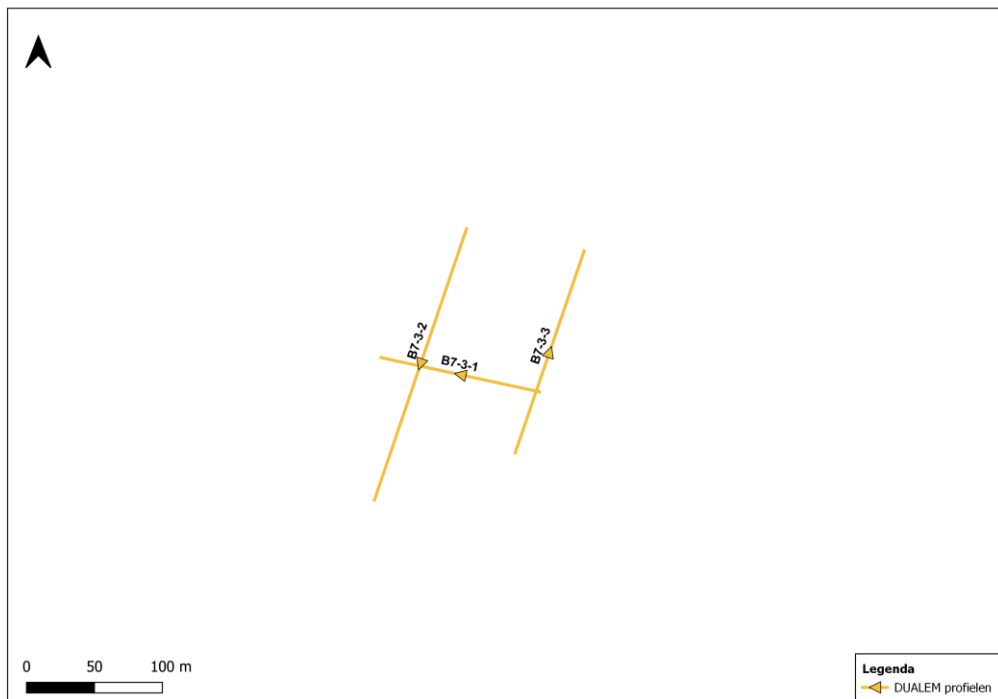
Figuur 21. Meetlocaties voor cluster B2-0. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Volgens de resultaten van de clustering bestaat de bodem op locatie B2-0 uit zavel, met daaronder zand (Figuur 8). De DUALEM resultaten tonen aan dat de gemeten weerstanden hoog zijn. De gelaagdheid van de bodem is terug te zien in de metingen. In het midden van het profiel zijn er lagere weerstanden te observeren, veroorzaakt door de aanwezigheid van een laag met een hoger kleigehalte (zavel) t.o.v. de onderliggende zand laag. Al met al zijn de weerstanden dusdanig hoog dat er vanuit kan worden gegaan dat zich hier een zoetwaterzone van >6 m bevindt. De handmetingen uitgevoerd door Antea in april 2023 bevestigen dit beeld (EC van 0.9 mS/cm op 2.8 m diepte, en 1.2 mS/cm op 5.3 m diepte).



Figuur 22. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B2-0.

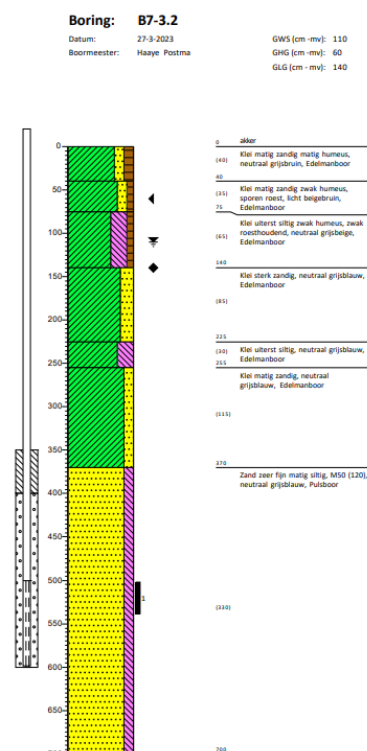
## B7-3



Figuur 23. Meetlocaties voor cluster B7-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

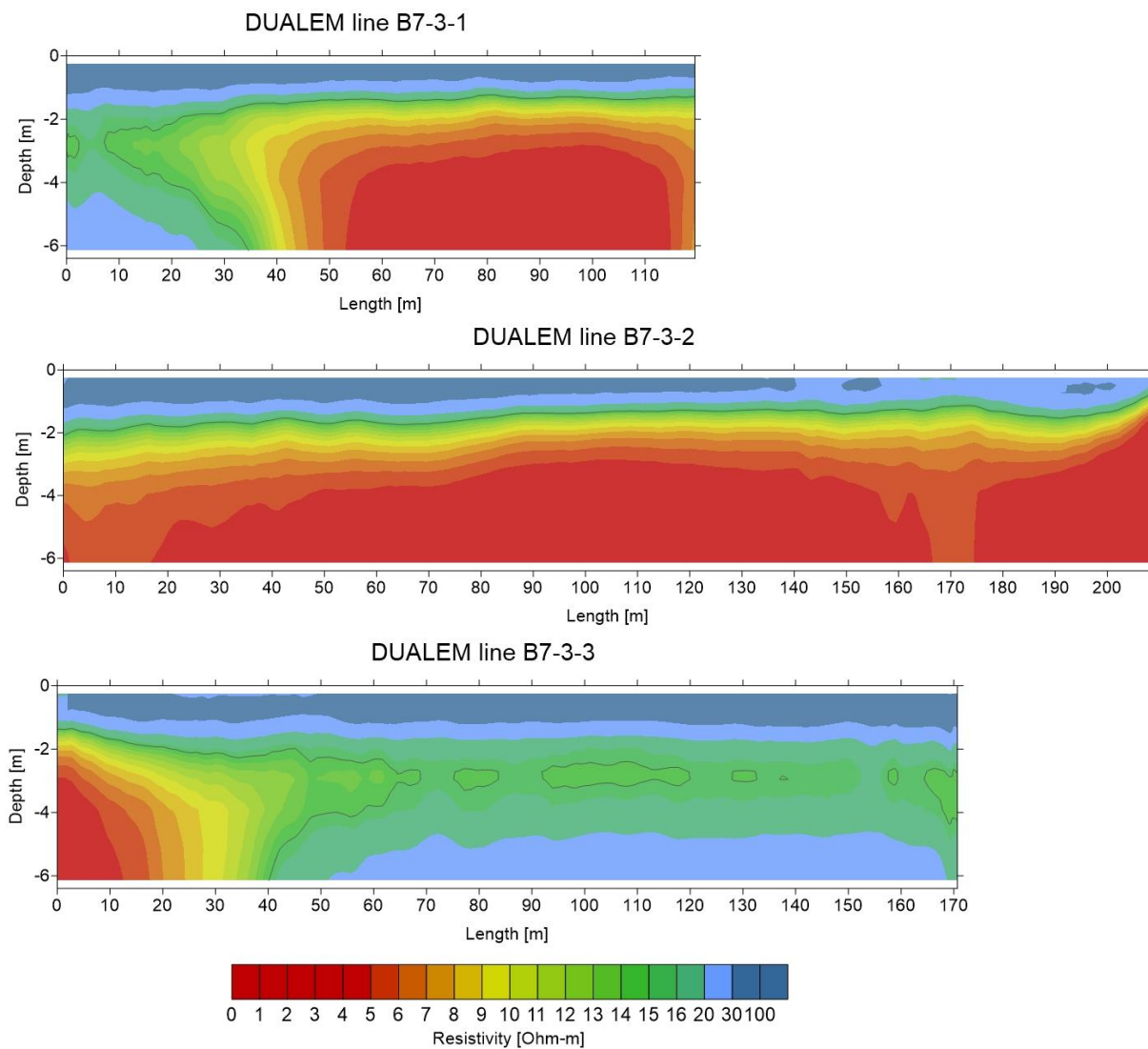
Volgens GeoTop bestaat de bodem op locatie B7-3 tussen 1 en 2 m onder maaiveld uit zavel, daaronder bevindt zich zand tot 5 m diepte (Figuur 8). De drainage watert af op het oosten. In totaal zijn er drie profielen gelopen, waarvan er twee haaks op de drains liggen (B7-3-2 en B7-3-3).

In de metingen is de gelaagdheid van de bodem terug te zien (Figuur 22). Het lijkt er alleen op dat - in tegenstelling tot de verwachtingen n.a.v. de GeoTop data en bodemclustering - de zand laag pas dieper begint. In de profielen B7-3-1 en B7-3-3 is namelijk te zien dat de overgang van een wat lagere weerstand (zavel) naar een hogere weerstand van 20-30 Ohm m (zand), op circa 4.5 m diepte ligt. De diepere ligging van het zand is ook terug te zien in de boorstaat van deze locatie (Antea, maart 2023). De hoge weerstand van 20-30 Ohm m op 5-6 m diepte geeft aan dat het grondwater hier waarschijnlijk zoet tot lichtbrak is. Dit is echter alleen het geval op de zuidoostkant van het perceel. De westkant van het perceel wordt gekenmerkt door een veel lagere weerstand. Tegen de zuidelijke waterloop aan, komt het zout omhoog tot



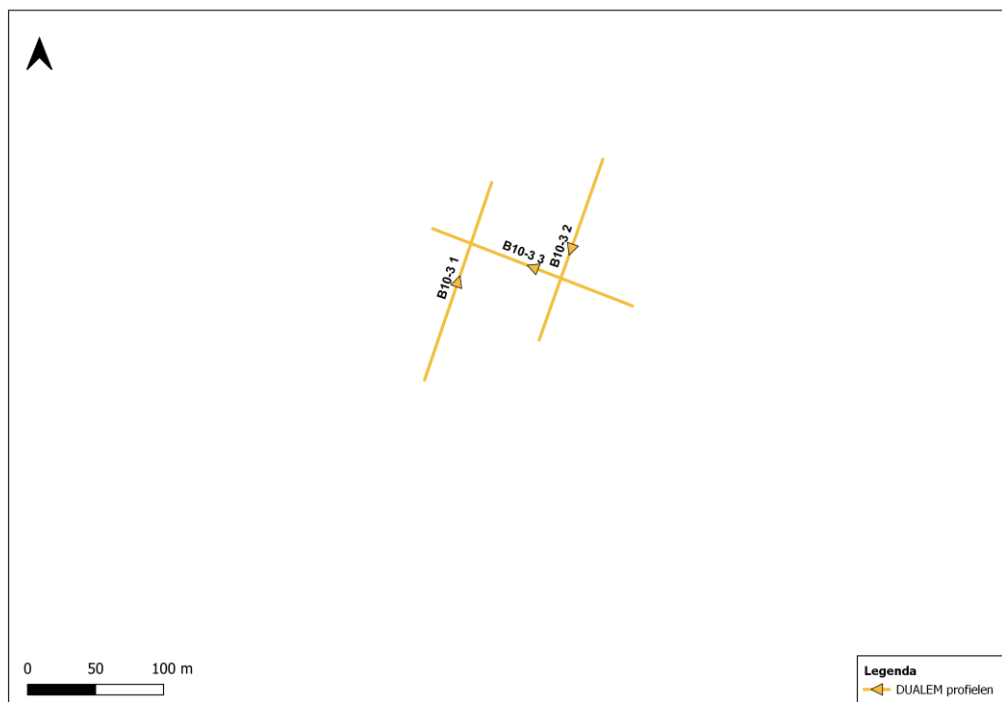
Figuur 24. Boorstaat van locatie B7-3 (Antea, april 2023).

grofweg 1.5m beneden maaiveld. Op de rest van het perceel wordt geschat dat het zoet-zout grensvlak zich op zo'n 2.5 tot 3 m diepte bevindt.



Figuur 25. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B7-3.

## B10-3



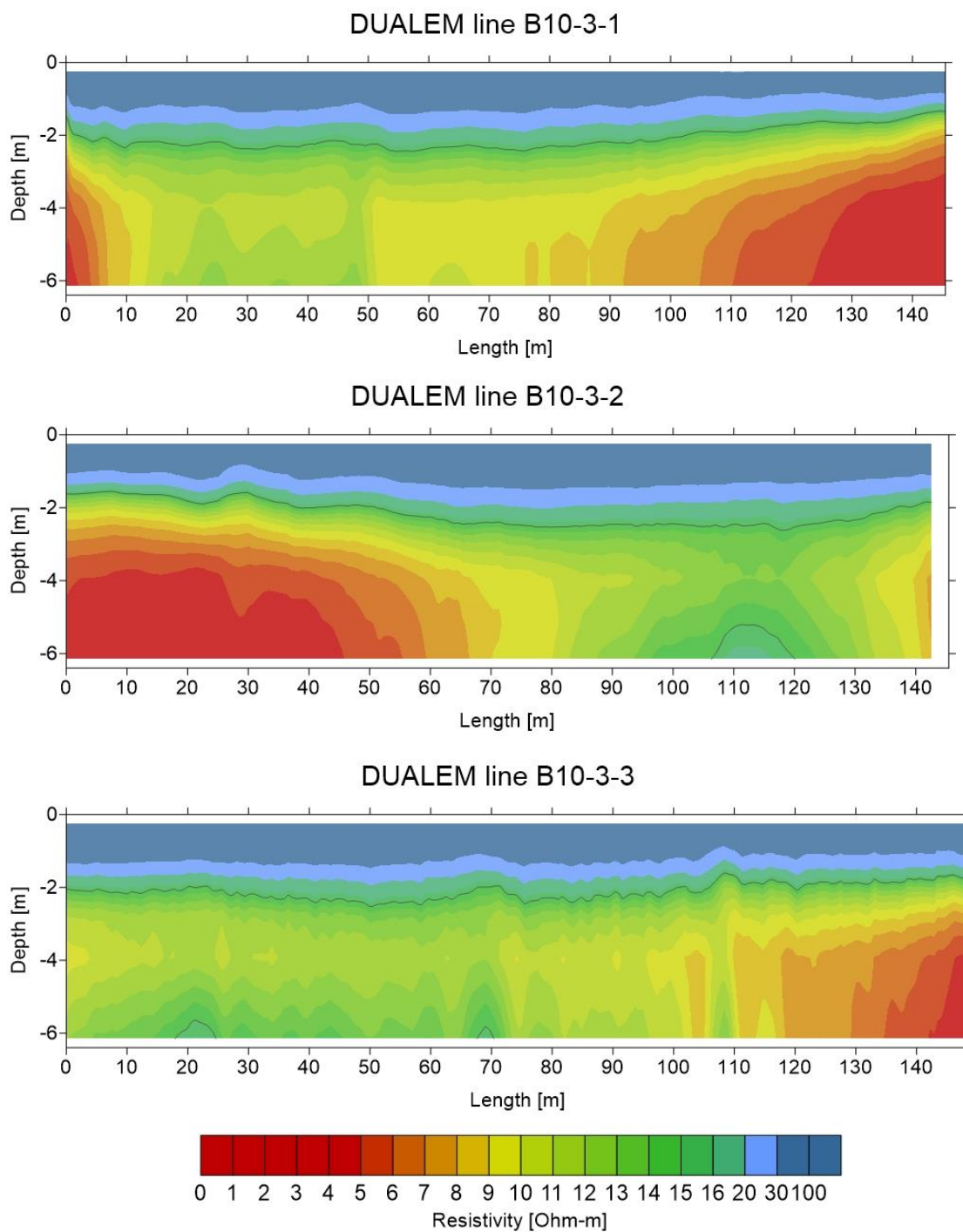
Figuur 26. Meetlocaties voor cluster B10-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

De bodem op locatie B10-3 bestaat voornamelijk uit zand (Figuur 8) en de drainage loopt in oostelijke richting. Twee van de drie profielen zijn dus loodrecht op de drainagemiddelen uitgevoerd: B10-3-1 en B10-3-2. Figuur 24 toont de resultaten van de DUALEM-metingen.

In het noordwestelijke deel van het perceel reikt het zout naar schatting tot een diepte van 2,5 m onder het maaiveld. Vervolgens zakt het zoutgehalte na ongeveer 40 m richting het zuidoosten tot ongeveer 3-4 m onder het maaiveld (B10-3-3). Het zuidelijke deel van het perceel vertoont over het algemeen een iets hogere weerstand en bevat waarschijnlijk zoet tot licht brak grondwater. Een uitzondering hierop is het gebied direct grenzend aan de zuidelijke waterloop, waar het zout weer dichterbij het oppervlak komt.

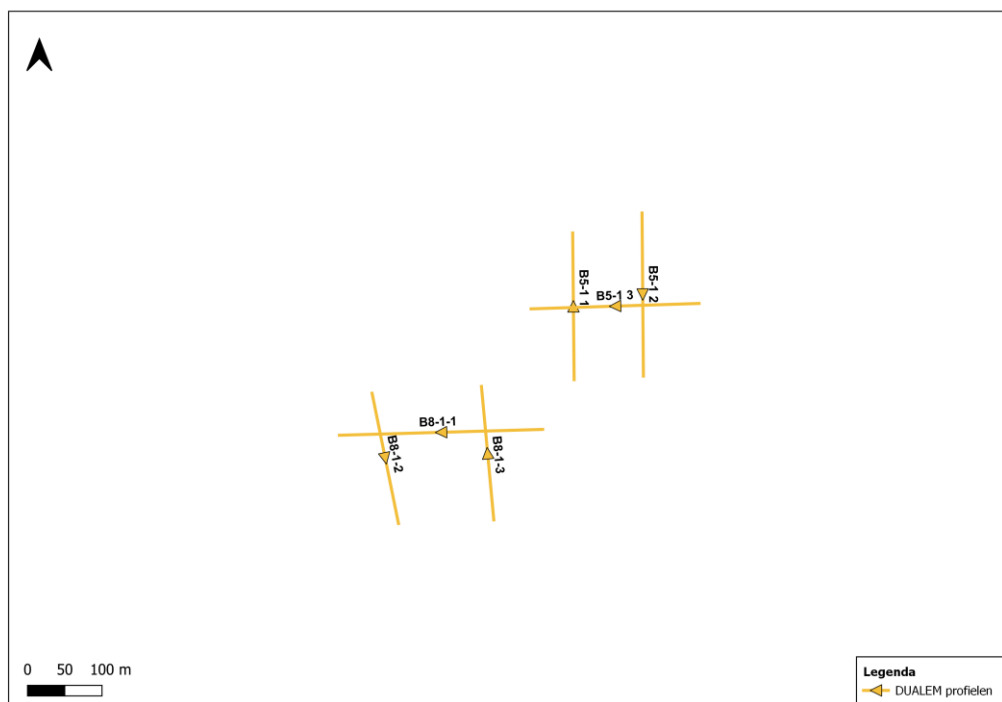
Op het meest noordelijke gedeelte van het perceel lijkt het zoet-zoutgrensvlak zich te bevinden op een diepte van ongeveer 2,5-3 m. De peilbuizen zijn geplaatst rond de kruising van profiel B10-3-1 en B10-3-3. De uitgevoerde EC-metingen op de locaties van de peilbuizen (Antea, april 2023) bevestigen inderdaad dat het zoet-zoutgrensvlak op dit deel van het perceel rond een diepte van 3-4 m ligt; op  $\pm 2,5$  m diepte is een EC-waarde van 1,9 mS/cm gemeten, terwijl de EC-waarde op een diepte van  $\pm 5,5$  m 18 mS/cm bedraagt.





Figuur 27. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B10-3.

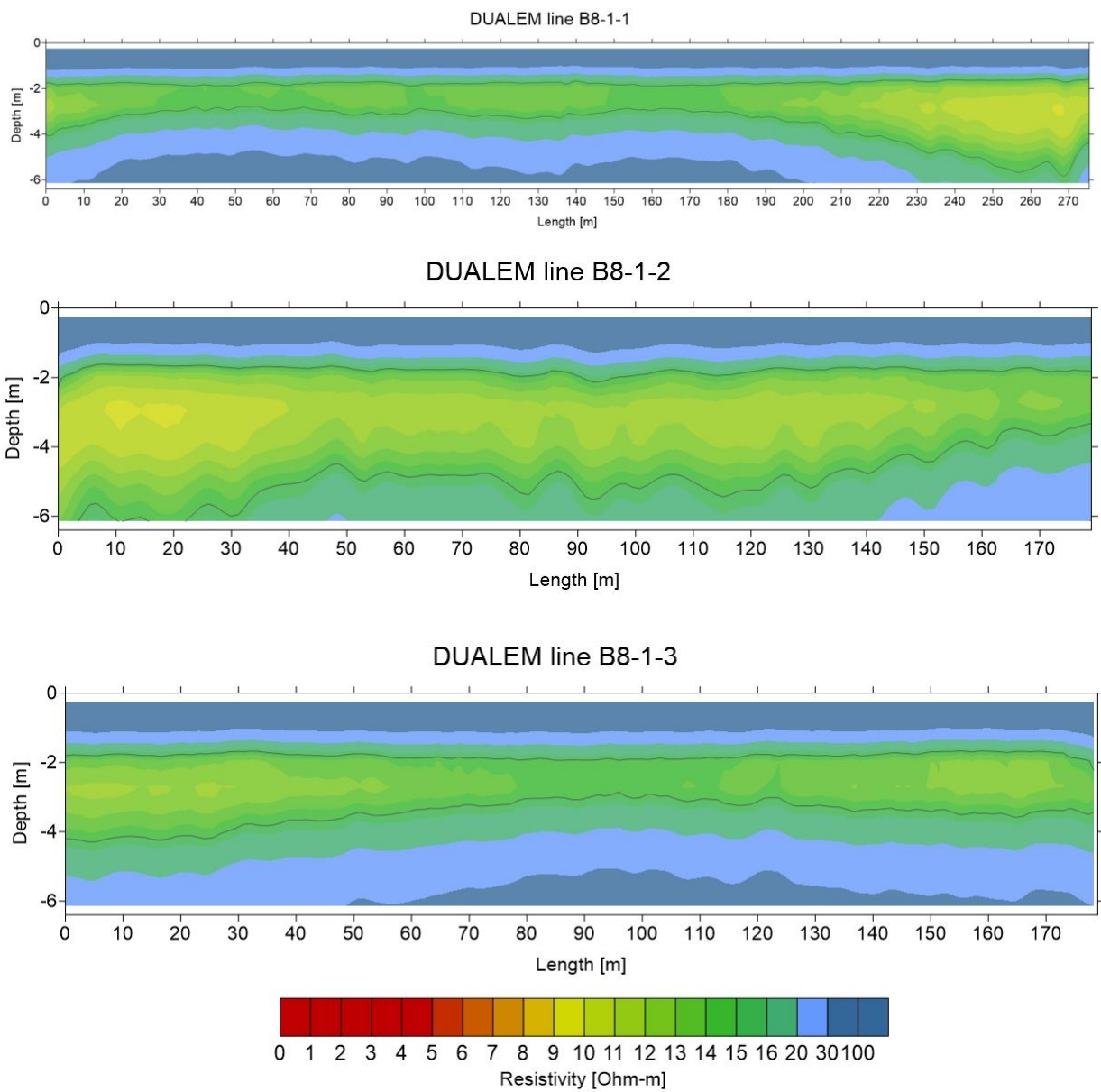
## B8-1



Figuur 28. Meetlocaties voor clusters B8-1 en B5-1. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

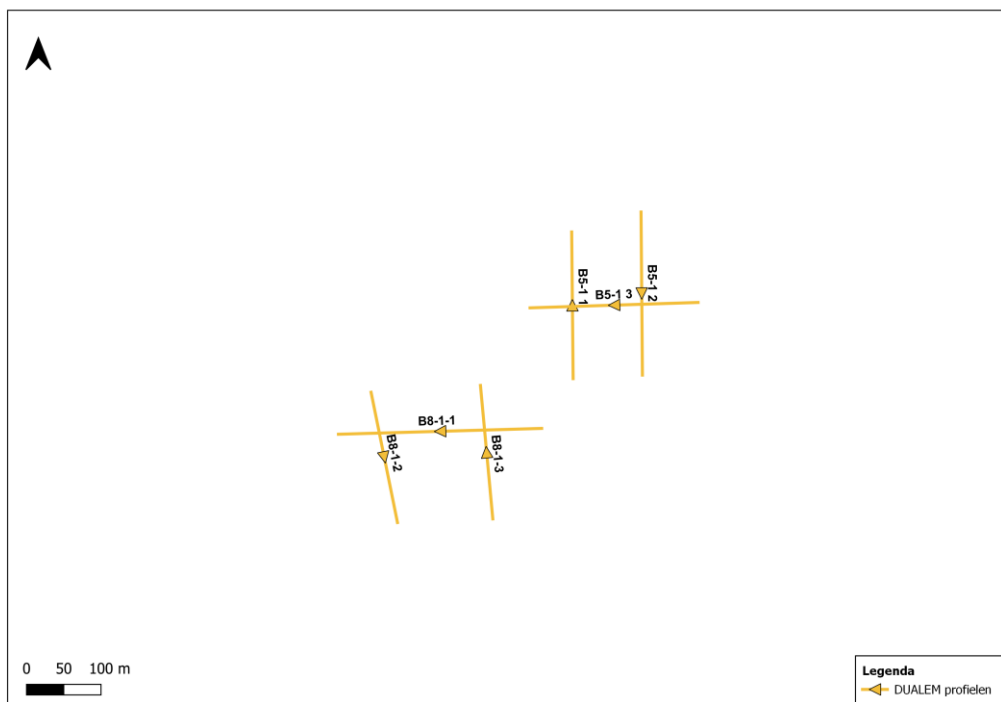
Volgens de GeoTop data bestaat de bodem op locatie B8-1 uit een gelaagd zand-zavel profiel (Figuur 8). Het perceel watert af richting het westen, wat betekent dat de profielen B8-1-2 en B8-1-3 haaks op de drainage zijn gelopen.

Over het algemeen is de gemeten weerstand vrij hoog, met op sommige plekken een weerstand  $>30$  Ohm m op 6 m diepte. Dit betekent dat het zeer waarschijnlijk is dat zich op deze locatie een zoetwater zone bevindt van ten minste 6 m. Verder is de zavel laag duidelijk terug te zien in de metingen: de lagere weerstand variërend tussen de  $\pm 2$  en 5 m diepte duidt op een laag met een hoger kleigehalte. Aan de west kant van het perceel lijkt de zavel laag dikker dan verwacht n.a.v. de GeoTop data en de bodemclustering.



Figuur 29. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B8-1.

## B5-1



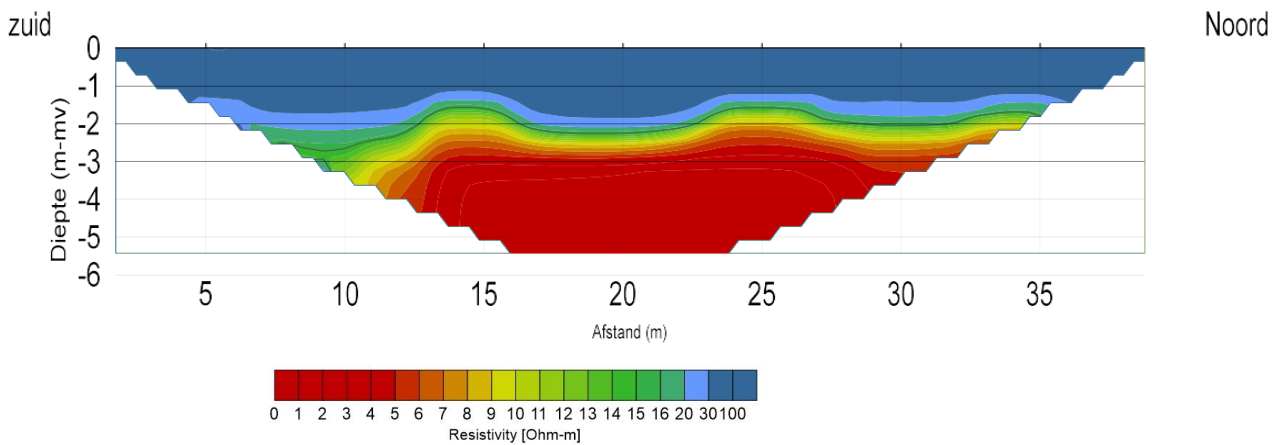
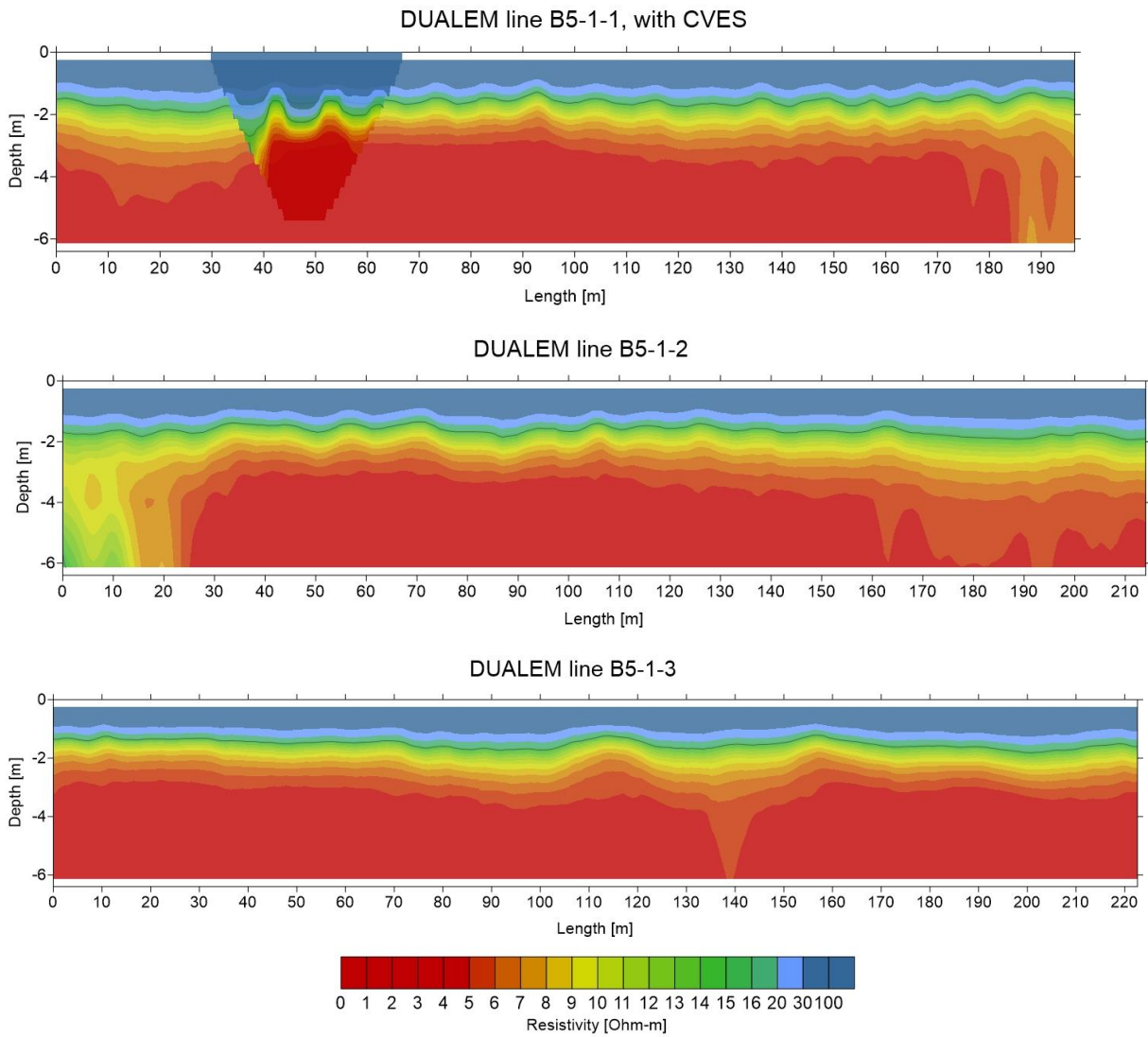
Figuur 30. Meetlocaties voor clusters B8-1 en B5-1. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Volgens GeoTop en de bodemclustering bestaat de bodem op locatie B5-1 tot 5m diepte uit zand (Figuur 8). De drainage op dit perceel ligt in noordoostelijke richting; de profielen B5-1-1 en B5-1-2 zijn dus haaks op de drainage gelopen. De resultaten van de DUALEM metingen tonen aan dat de weerstand op dit perceel laag is (Figuur 28), ondanks de zandige ondergrond. Dit betekent dat we op deze locatie te maken hebben met brak grondwater. Ook de ligging van de drainage is duidelijk terug te zien in de metingen. Op de plekken van de drainagemiddelen wordt het zout omhoog getrokken, wat leidt tot de vorming van duidelijke bolle neerslaglenzen. Het grensvlak wordt geschat op een diepte tussen de 1.5-2.5 m.

Ondanks de toekenning aan een lage kwel klasse, laten de metingen zien dat er hier wel degelijk een kwelflux aanwezig is. De metingen van de actuele grondwaterstand en stijghoogte van de ondiepe en diepe peilbuis bevestigen dit. In de freatische peilbuis werd namelijk een grondwater stand van 1.38 m beneden maaiveld gemeten, terwijl in de diepere peilbuis een stijghoogte van 1.32 m onder maaiveld werd gemeten (Antea, april 2023). Het stijghoogte verschil van 6 cm toont aan dat er een kwelflux aanwezig is, die zorgt voor de vorming van de neerslaglenzen.

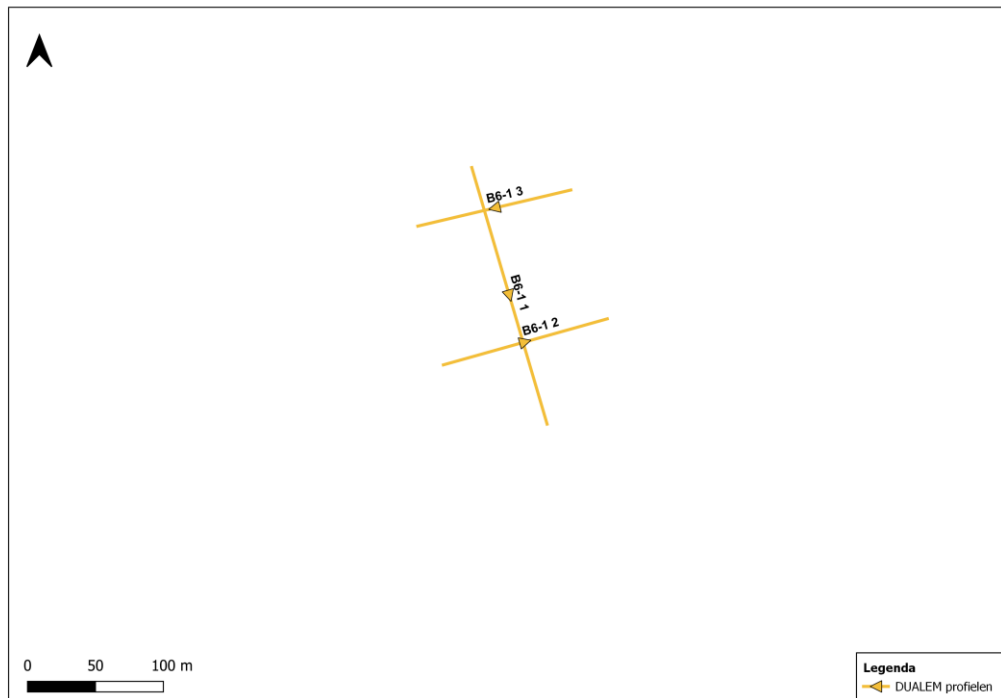
Om de neerslaglenzen nog gedetailleerder in kaart te brengen is een extra CVES meting uitgevoerd. De resultaten van de CVES meting zijn te zien in Figuur 29. Ook in de resultaten van de CVES meting is duidelijk de ligging van de (oude) drainage zichtbaar. Ook hier is te zien dat het grensvlak zich tussen de 1.5 en 2.5 m diepte bevindt, en dat het zout bij de drains omhoog wordt getrokken.

Figuur 31. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B5-1.



Figuur 32. Resultaten van de CVES meting van cluster B5-1.

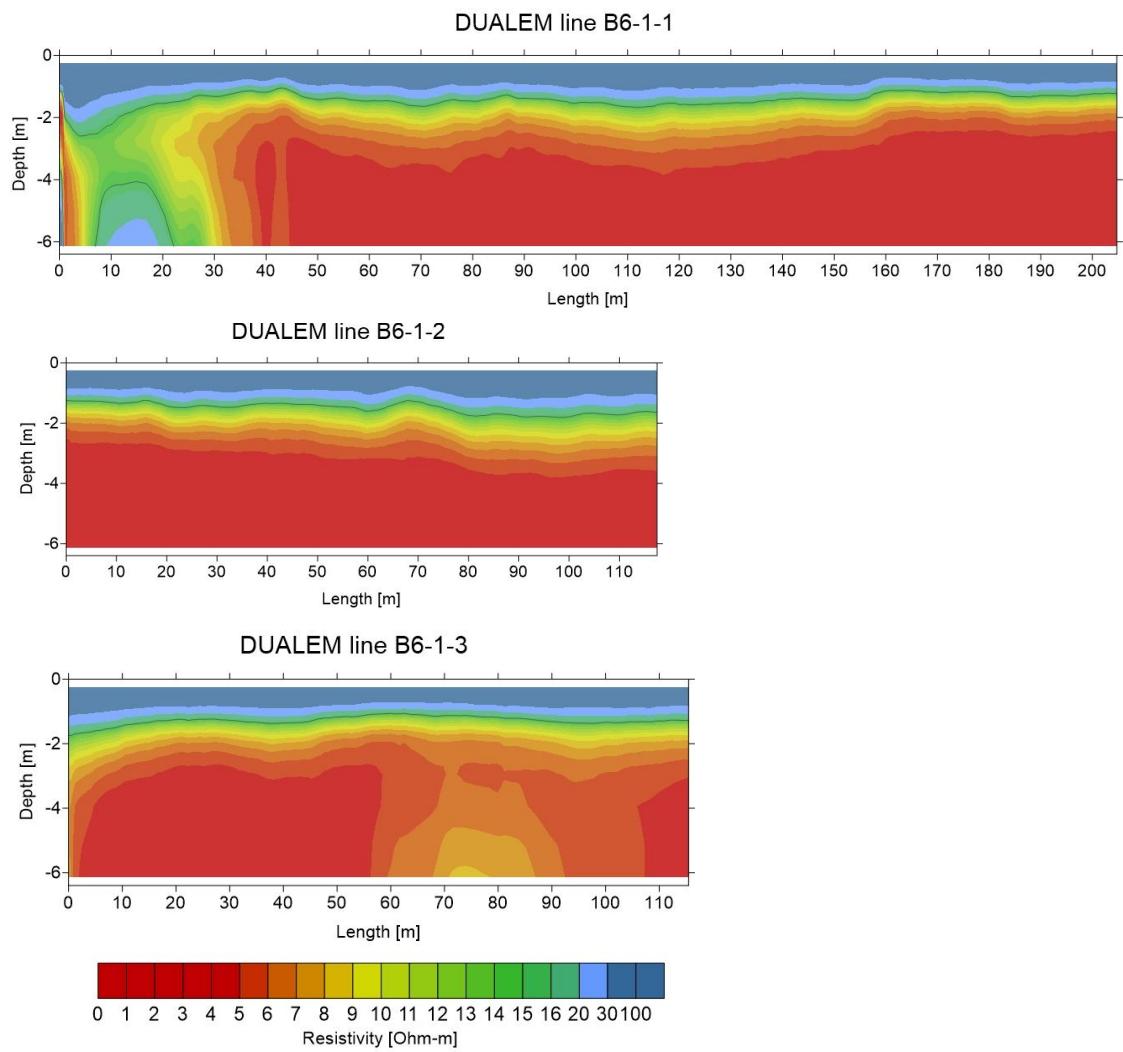
## B6-1



Figuur 33. Meetlocaties voor cluster B6-1. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

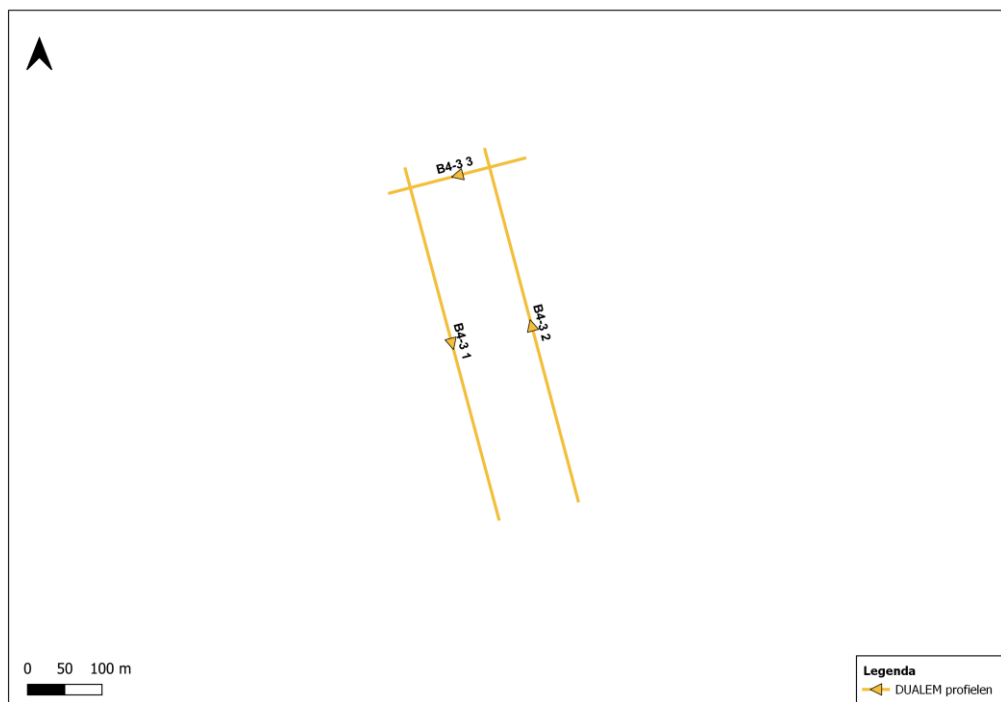
Op locatie B6-1 ligt de drainage in zuidelijke richting en bestaat de bodem, volgens de clustering, uit een gelaagd zand-zavel profiel. De DUALEM metingen B6-1-2 en B6-1-3 zijn haaks op de drains uitgevoerd. Ondanks de verwachte lage kwelflux o.b.v. de kwelkaarten, laten de lage weerstanden van de metingen (<5 Ohm m) zien dat het zoet-zout grensvlak toch ondiep zit. De diepte van het grensvlak wordt voor het grootste deel van het perceel geschat op 1.5 tot 2 m. De gemeten EC van 8.4 mS/cm op 2.5 m diepte bevestigt dit beeld (Antea, april 2023). Ook de gemeten grondwaterstand en stijghoogte van de ondiepe en diepe peilbuis laten de aanwezigheid van een kwelflux zien. In de freatische peilbuis werd namelijk een grondwater stand van 1.49 m beneden maaiveld gemeten, terwijl in de diepere peilbuis een stijghoogte van 1.20 m onder maaiveld werd gemeten (Antea, april 2023). Het stijghoogte verschil van 29 cm toont aan dat er een kwelflux aanwezig is.

Helemaal in het noorden neemt de weerstand echter sterk toe: tot 20-30 Ohm m op 6 m diepte. Op dit deel is in de metingen ook de zavel laag tussen ca. 2.5 – 4.5 m te herkennen. De toename in weerstand op dit segment wijst zeer waarschijnlijk op de aanwezigheid van lichtbrak tot zoet grondwater tot 6m diepte.



Figuur 34. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B6-1.

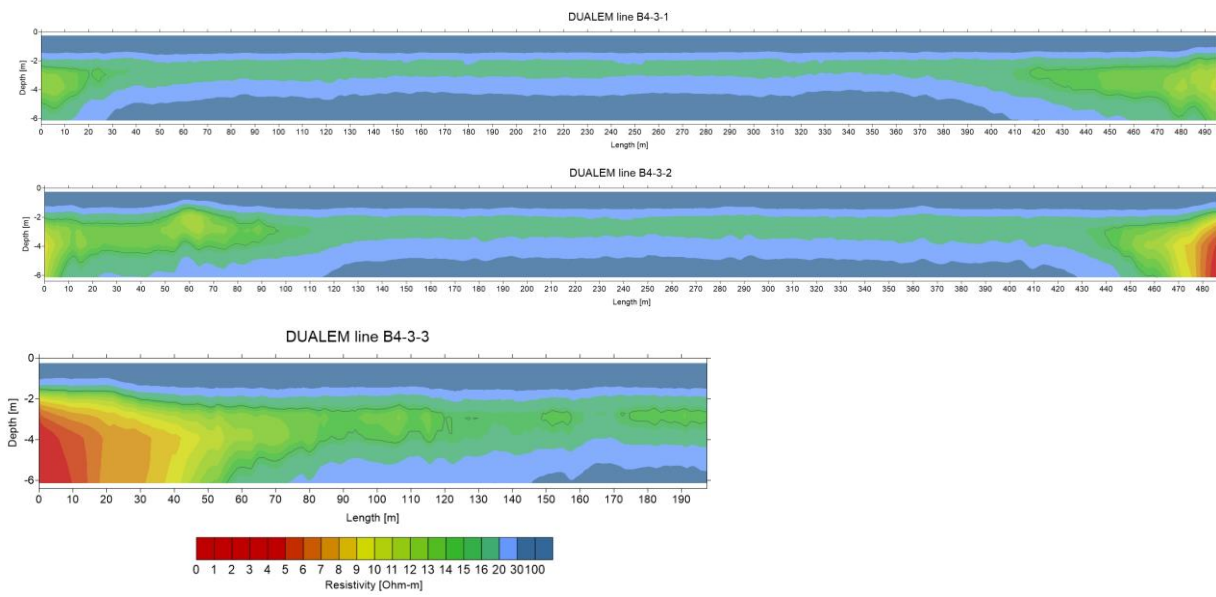
## B4-1 en B4-3



Figuur 35. Meetlocaties voor cluster B4-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

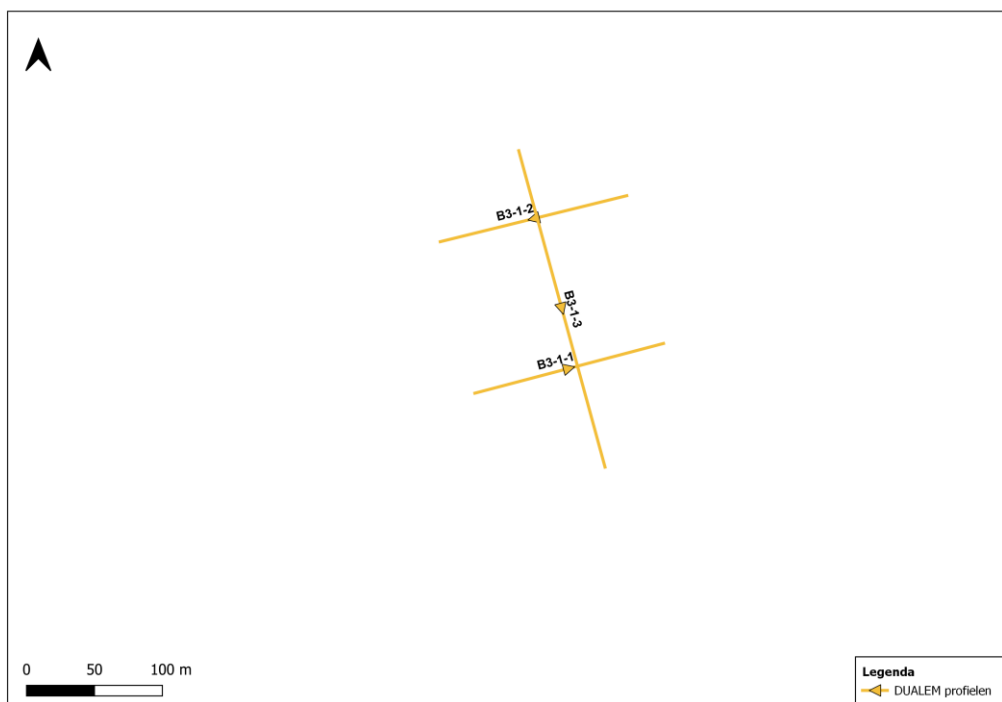
De bodem op locatie B4-3-1 is heterogeen en bestaat uit zowel klei, zavel als zand. De drainage op het perceel loopt in westelijke richting; de profielen B4-3-1 en B4-3-2 zijn dus haaks op de drainage gelopen. Ondanks de verwachte hoge kwelflux, zijn over het algemeen de gemeten weerstanden hoog. Dit betekent dat zich hier hoogstwaarschijnlijk een zoetwaterzone bevindt van minstens 6 m dik. De gemeten EC van 1.2 mS/cm op 5.5 m diepte (Antea, april 2023) laat zien dat dit inderdaad het geval is. De gelaagdheid van de bodem is terug te zien in de metingen met een lagere weerstandslaag tussen de 2 m en 4.5 m diepte. De metingen laten zien dat het zout wel omhoog komt in de noordoostelijke hoek van het perceel.





Figuur 36. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B4-3.

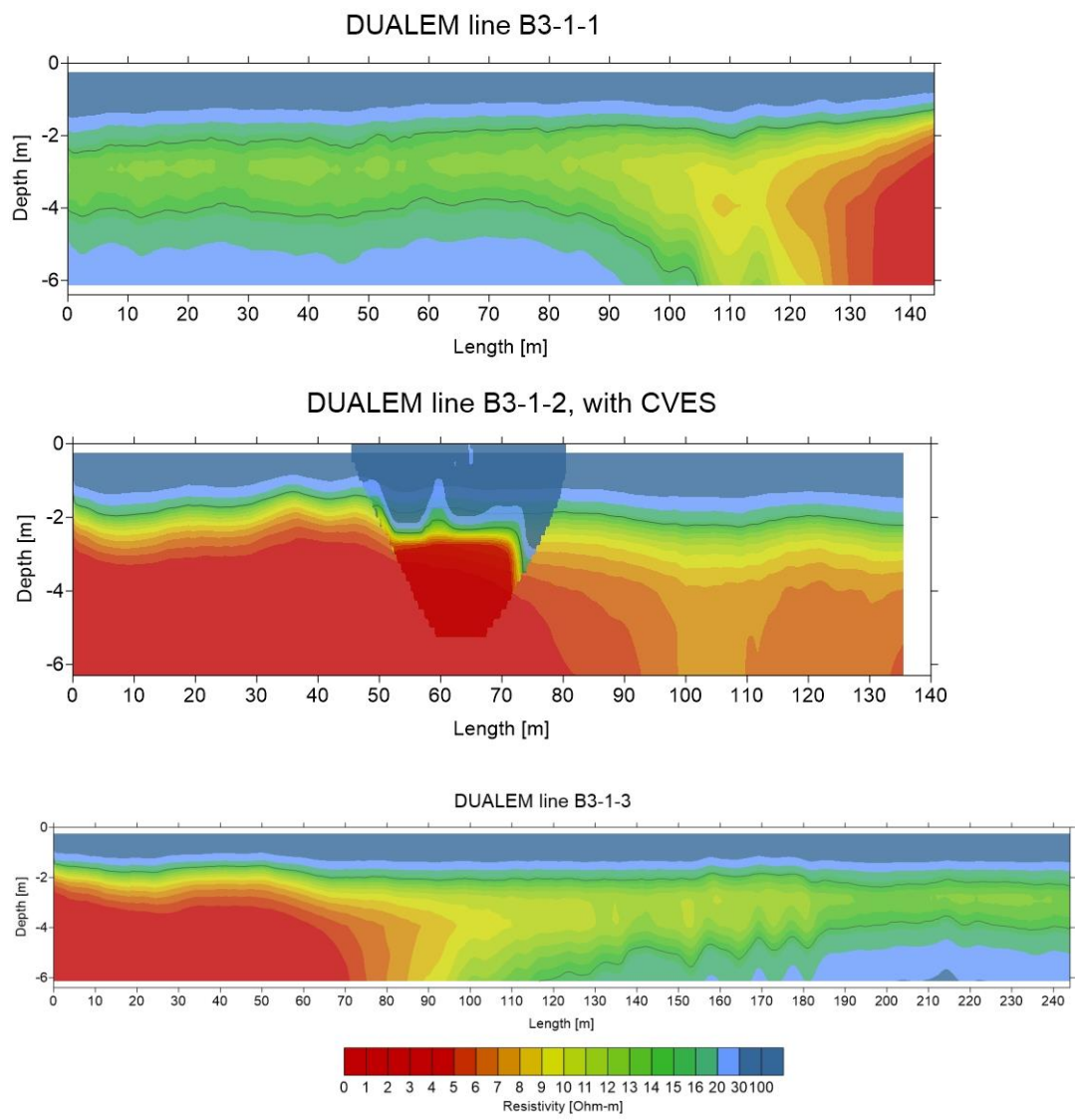
## B3-1



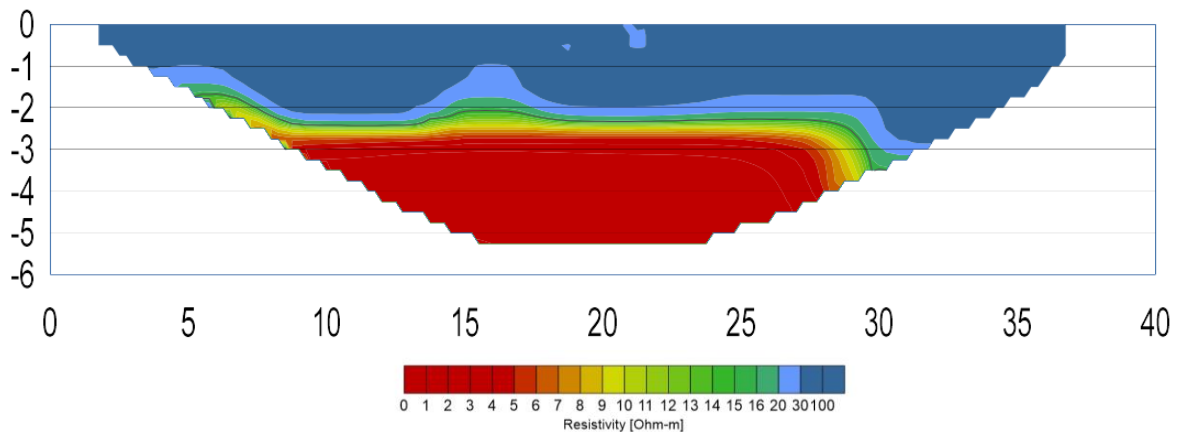
Figuur 37. Meetlocaties voor cluster B3-1. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Volgens de clustering heeft de bodem op locatie B3-1 een zandig karakter. De drainage op het perceel loopt in zuidelijke richting. Profiel B3-1-3 is parallel aan de drainage gelopen, terwijl de profielen B3-1-1 en B3-1-2 haaks op de drains zijn gelopen. De resultaten van de DUALEM metingen worden weergegeven in Figuur 33. De metingen tonen grote variaties in weerstand binnen het perceel. De noordkant van het perceel laat een veel lagere weerstand zien vergeleken met de zuidkant van het perceel. Ook laat de oostelijke kant van het perceel een sterke afname in weerstand zien; veroorzaakt door de invloed van de oostelijk gelegen - naar verwachting brakke - waterloop. De diepte van het zoet-zout grensvlak wordt aan de noordkant van het perceel geschat op ca. 2-3 m. In zuidelijke richting zakt het zout verder weg en neemt het zoutgehalte van het grondwater vermoedelijk af. Aan de zuidkant van het perceel neemt de weerstand toe tot meer dan 20 Ohm m op 5-6 m diepte, wat betekent dat het zoet-zout grensvlak buiten meetbereik ligt en zich hier een zoetwaterzone bevindt.

Ongeveer halverwege profiel B3-1-2 is ook een CVES meting uitgevoerd om een gedetailleerder beeld te krijgen van de ligging van het zoet-zout grensvlak. De resultaten worden weergegeven in Figuur 36. Ook hier is te zien dat er een scherpe overgang in weerstand zit op ca. 2.5 m diepte, wat duidt op de overgang naar brak grondwater. Rond de 6 en 16 m lijkt het zout wat omhoog te komen, mogelijk door de aanwezigheid van de drainage.

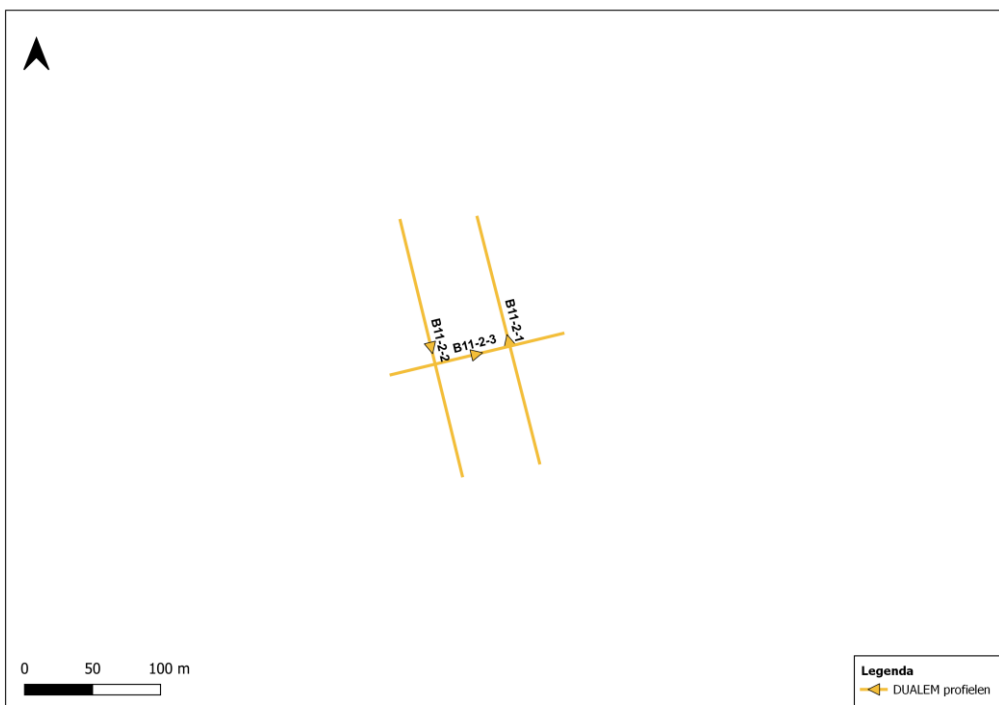


Figuur 38. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B3-1.



Figuur 39. Resultaten van de CVES meting van cluster B3-1.

## B11-2



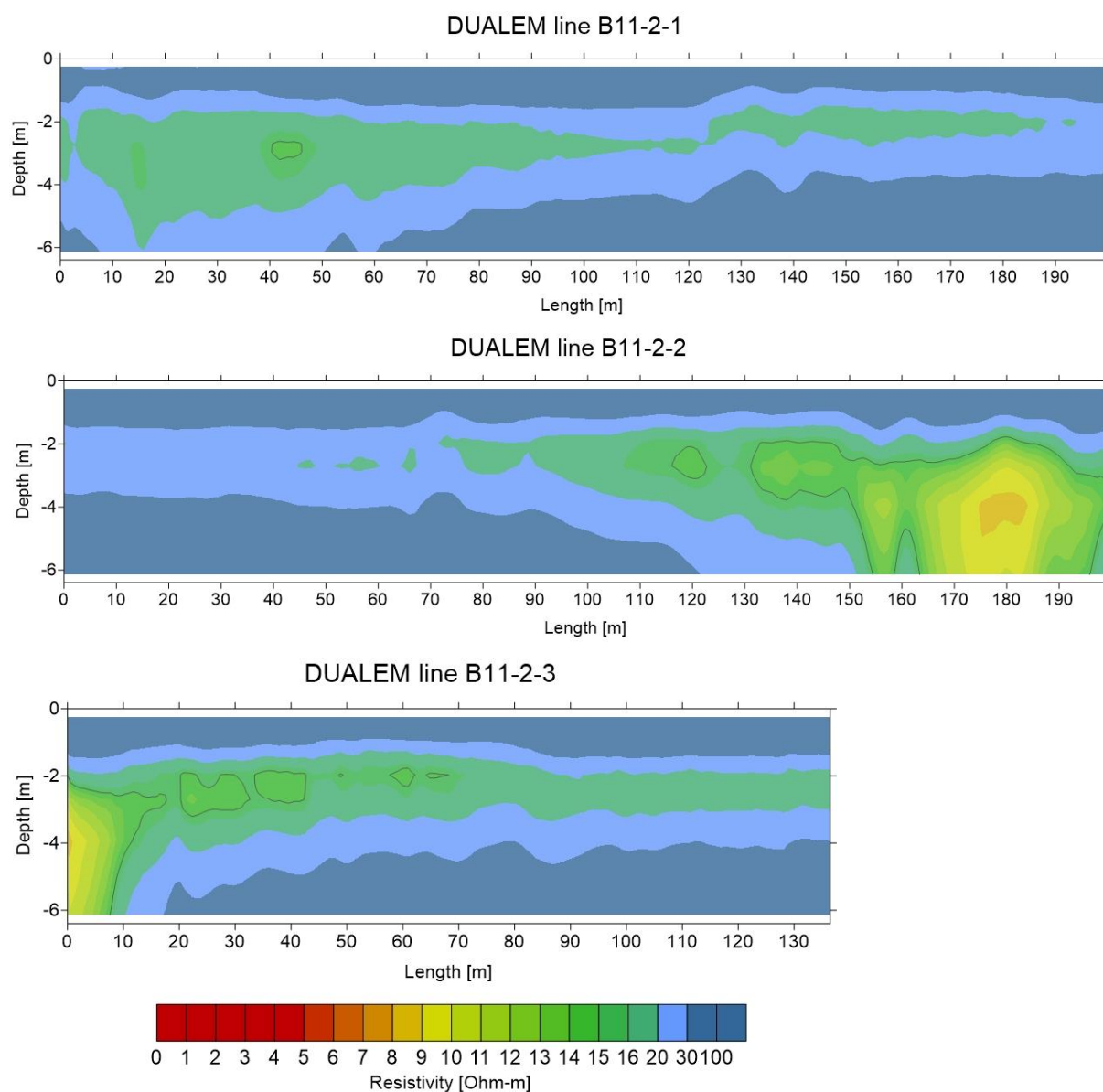
Figuur 40. Meetlocaties voor cluster B11-2. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Locatie B11-2 is toegewezen aan cluster 11, wat wordt gekenmerkt door een zandige bodem met een dunne laag zavel op een diepte van 2 meter. De resultaten van de drie DUALEM-profielen worden weergegeven in Figuur 35.

Bij alle drie de DUALEM-profielen zijn er hoge weerstanden gemeten. Op veel plekken op het perceel is de gemeten weerstand op een diepte van 6 meter groter dan 30 Ohm m. Dit geeft aan dat het grondwater op deze locatie, ongeacht het bodemtype, zoet is. Dit

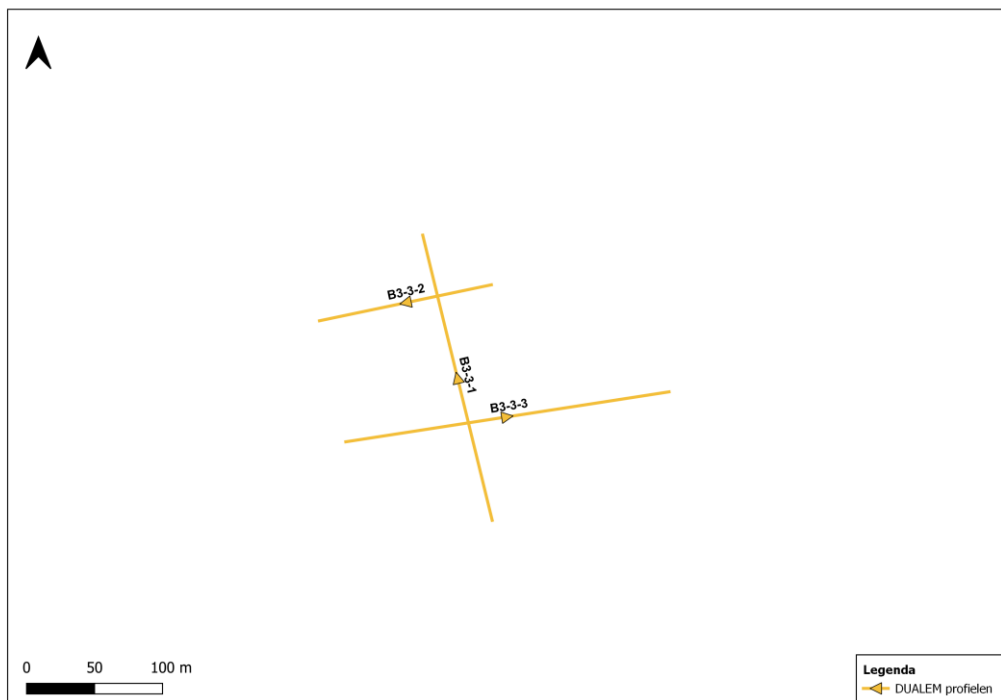
komt overeen met de gemeten elektrische geleidbaarheid (EC) van 3 mS/cm op een diepte van 5,5 meter op deze locatie (Antea, april 2023).

In de zuidwestelijke hoek van het perceel neemt de weerstand iets af. Dit kan worden veroorzaakt door een toename in het klei- of zoutgehalte in dit specifieke deel van het perceel. De metingen suggereren dat de zavelaag mogelijk dikker is dan aanvankelijk verwacht op basis van de bodemclassificatie en de GeoTop-gegevens.



Figuur 41. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B11-2.

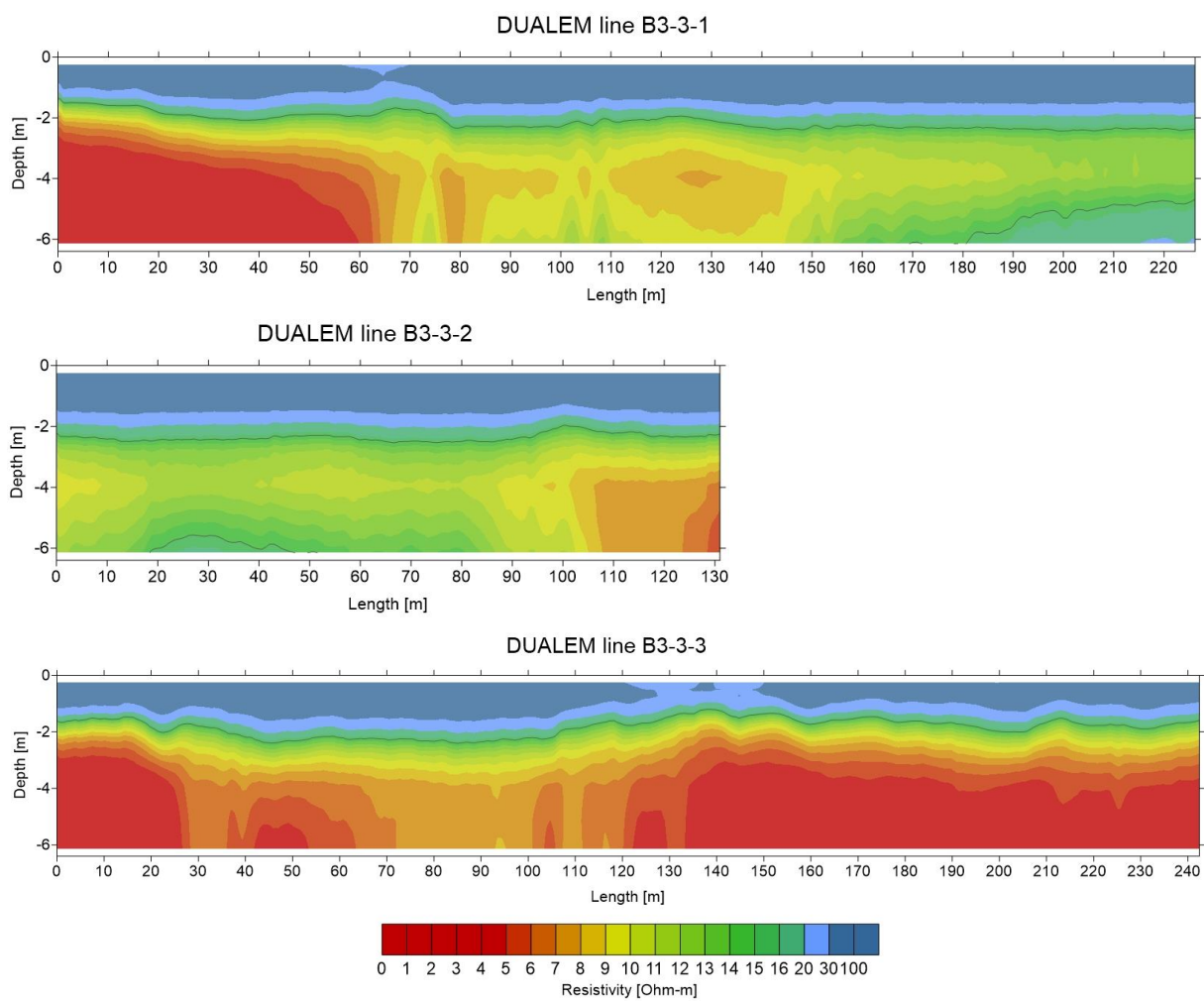
## B3-3



Figuur 42. Meetlocaties voor cluster B3-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

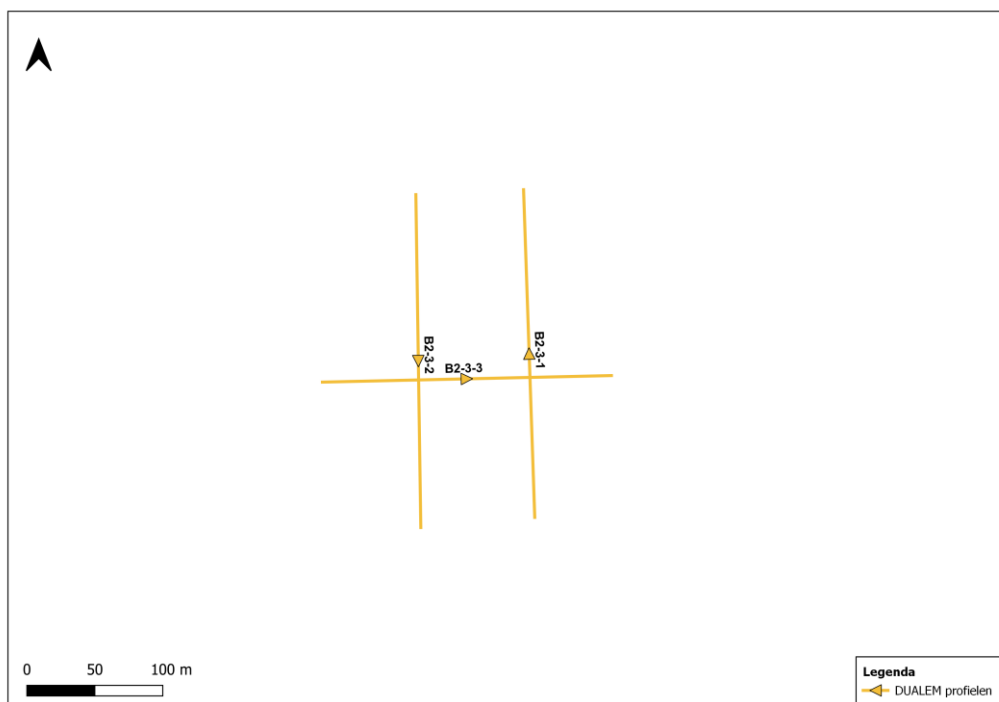
Dit perceel valt onder bodemcluster 3, waarvan het representatieve bodemprofiel bestaat uit zand met een zavelaag op een diepte van 4 meter. De profielen B3-3-2 en B3-3-3 zijn loodrecht op de drainage uitgevoerd, die in zuidelijke richting loopt. De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Figuur 34 en laten een duidelijk patroon van weerstandsverandering zien in noord-zuidelijke richting.

Aan de zuidkant van het perceel zijn lage weerstanden gemeten, lager dan 5 Ohm m, wat duidt op de ondiepe ligging van de zoet-zoutgrens. Op het meest zuidelijke punt van het perceel wordt de diepte van het zoet-zoutgrensvlak geschat op 2 meter. Ongeveer 50 meter naar het noorden zakt het grensvlak naar een diepte van 4 meter, waarna het zoutgehalte van het grondwater geleidelijk afneemt en het grondwater licht brak tot zoet wordt. De uitgevoerde EC-metingen (Antea, april 2023) in het grondwater aan de zuidkant van het perceel bevestigen ook de aanwezigheid van zout. Op een diepte van 2 meter en 5,5 meter zijn respectievelijk EC-waarden van 6 mS/cm en 19,6 mS/cm gemeten.



Figuur 43. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B3-3.

## B2-3

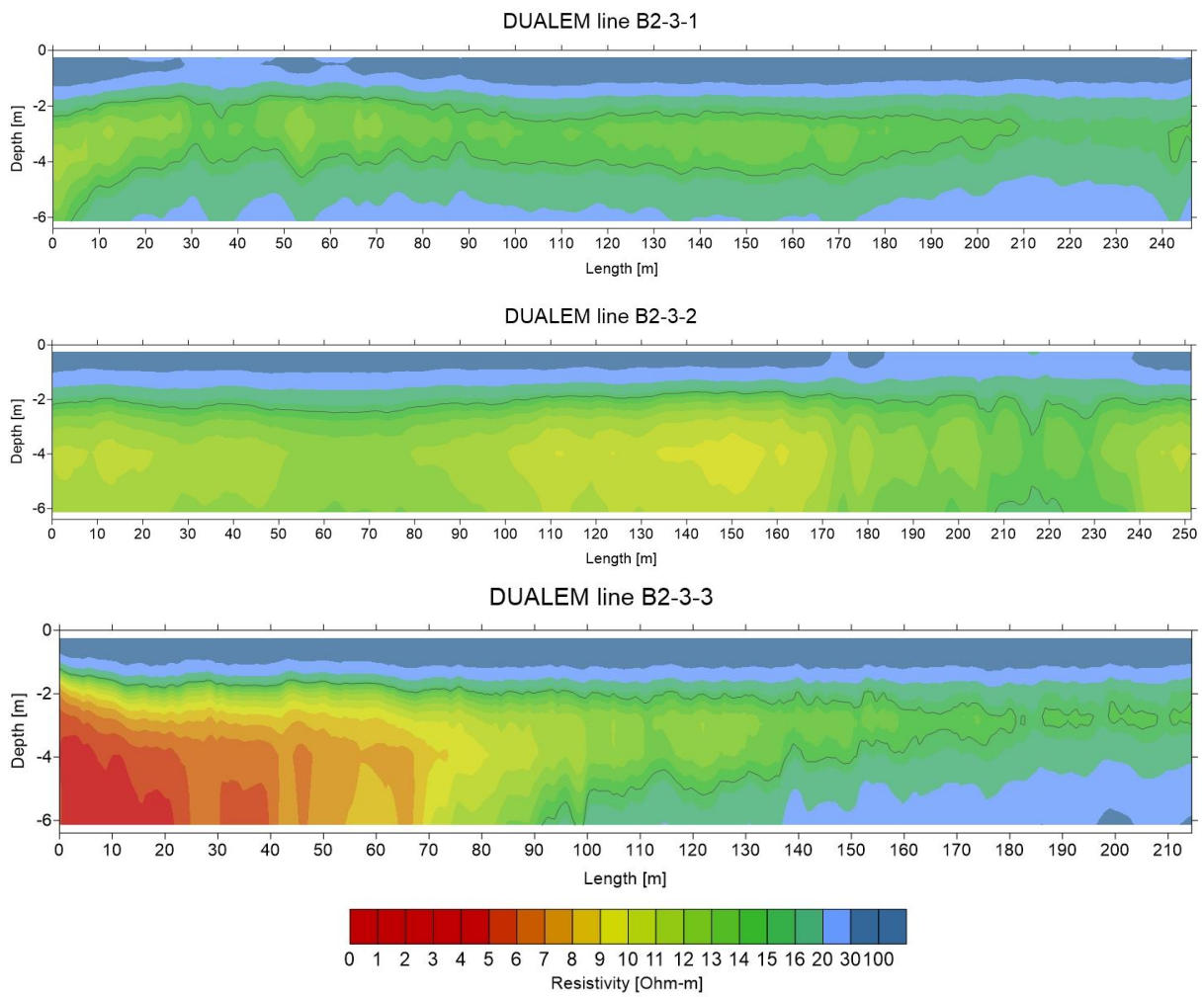


Figuur 44. Meetlocaties voor cluster B2-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

De bodem op locatie B2-3 valt onder cluster 2 en bestaat uit een zavelige toplaag met daaronder zand, vanaf een diepte van ongeveer 3,5 meter. De drainage loopt naar het zuiden, waardoor profiel B2-3-3 loodrecht op de drains is uitgevoerd. De resultaten van de metingen laten over het algemeen relatief hoge weerstanden zien, met als uitzondering de oostelijke zijde van het perceel (B2-3-3). Hier neemt de weerstand van de diepere lagen af tot onder de 5 Ohm m. Ongeacht het bodemtype, duidt dit op de aanwezigheid van brak grondwater op deze locatie.

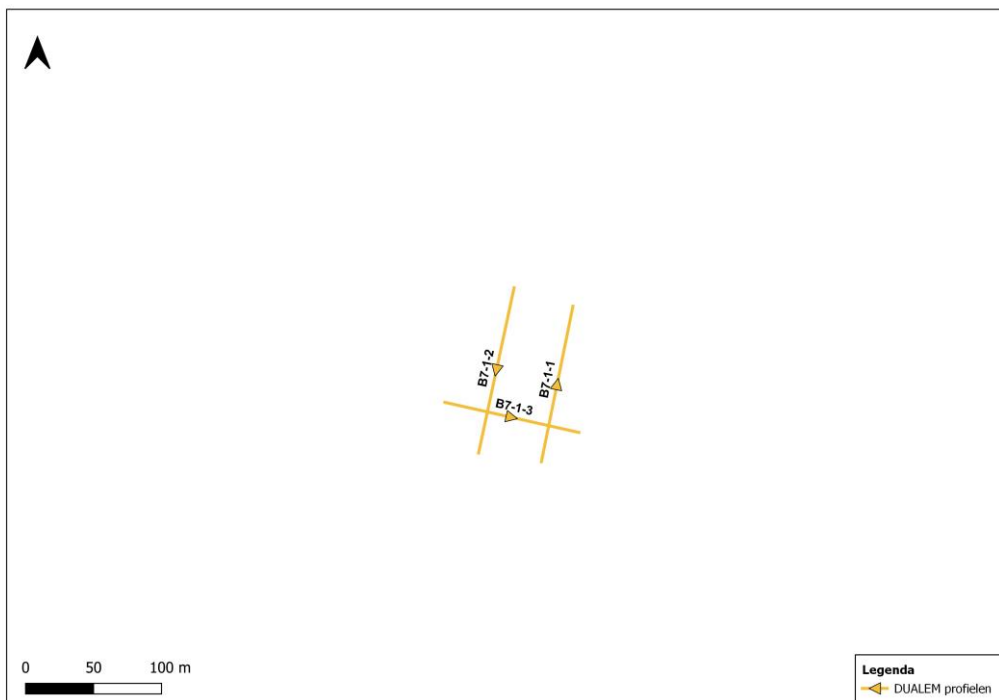
Op het meest oostelijke deel van het perceel wordt verwacht dat het zoet-zoutgrensvlak zich op een diepte van ongeveer 2 meter bevindt. Het grondwater op de rest van het perceel is vermoedelijk zoet tot licht brak, wat overeenkomt met de gemeten EC-waarden van respectievelijk 1,5 mS/cm en 1,9 mS/cm op een diepte van 2,5 meter en 5 meter (Antea, april 2023).





Figuur 45. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B2-3.

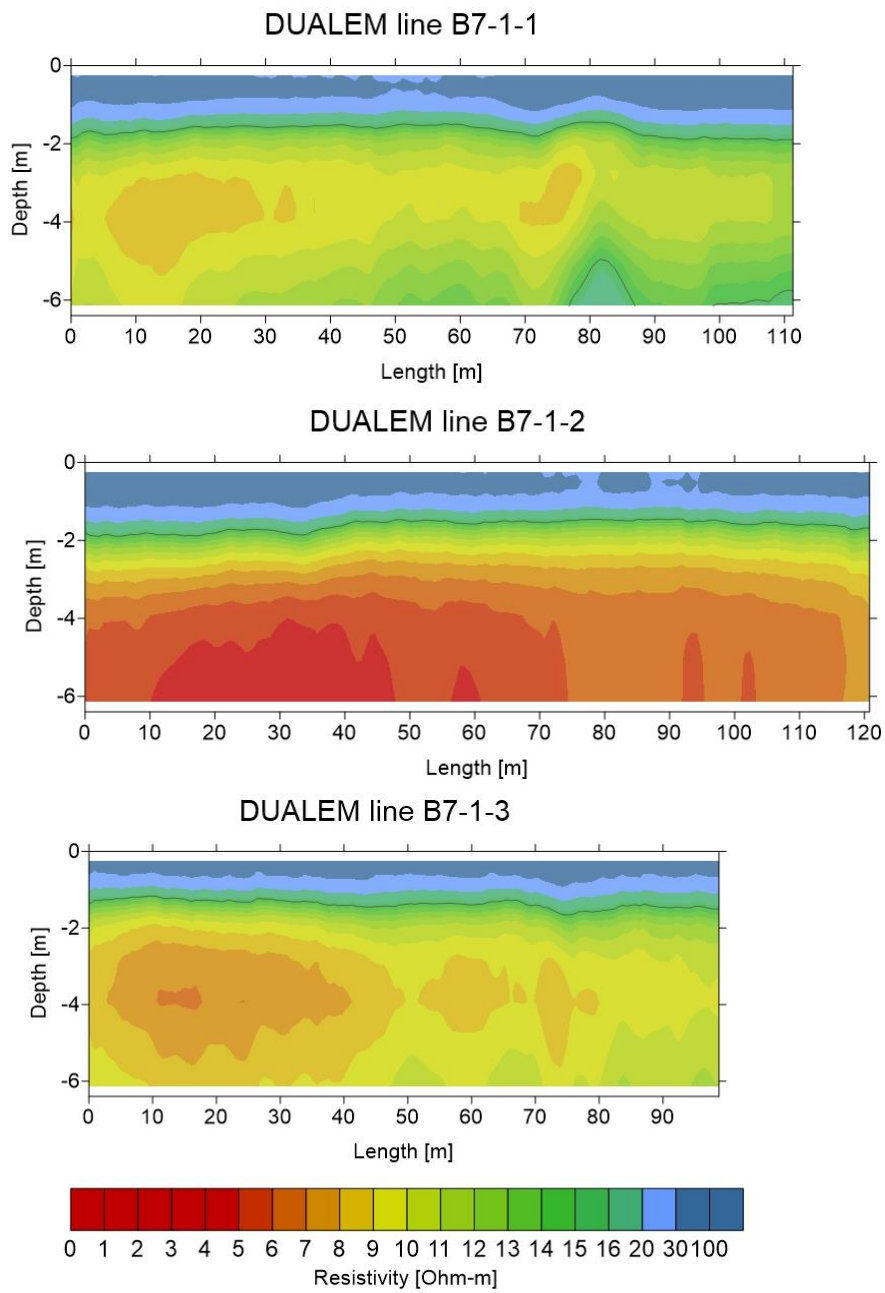
## B7-1



Figuur 46. Meetlocaties voor cluster B7-1. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

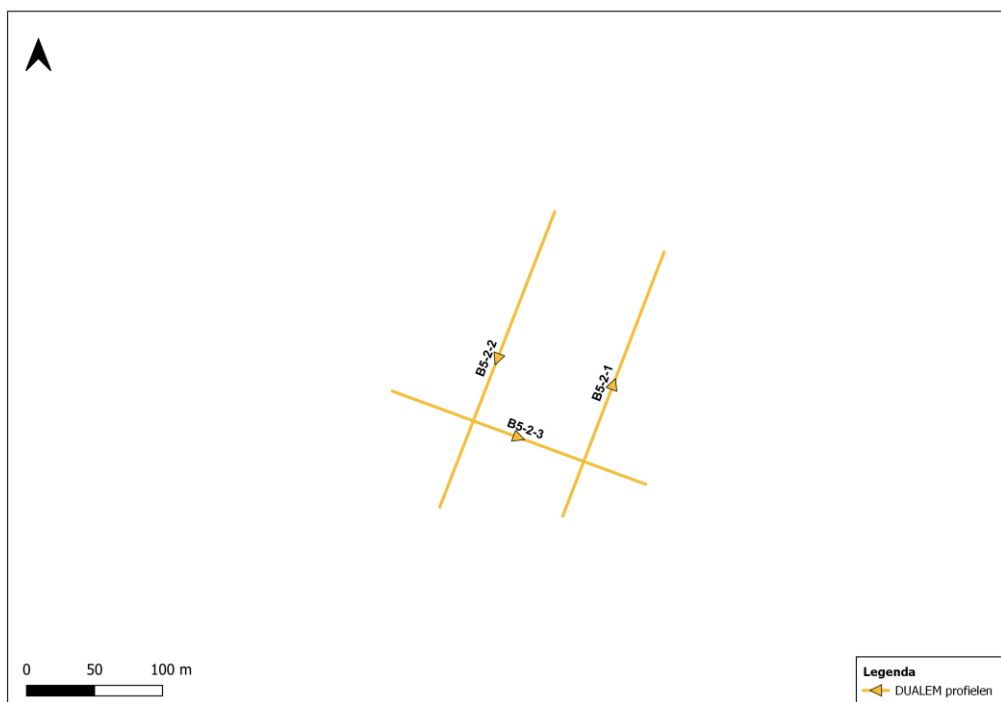
De drainage op locatie B7-1 watert af op het westen. Dit betekent dat de profielen B7-1-1 en B7-1-2 loodrecht op de drainagemiddelen zijn uitgevoerd. Het perceel is toegekend aan bodemcluster 7, wat bestaat uit een zavel-zand profiel, met de overgang naar zand op circa 2m onder maaiveld.

De resultaten worden weergegeven in Figuur 28. Uit de metingen blijkt dat de westzijde van het perceel gekenmerkt wordt door een lagere weerstand ten opzicht van de oostkant. Dit kan worden veroorzaakt door een kleiiger karakter van de bodem óf door een hoger zoutgehalte. Uit de boringen op locatie blijkt dat de diepere bodemlagen inderdaad uit zand bestaan. De gemeten weerstanden lager dan 20 Ohm m, in combinatie met de zandige bodem, duiden op de aanwezigheid van lichtbrak tot brak grondwater. Op de westelijke kant van het perceel is het zoutgehalte vermoedelijk hoger. De diepte van het zoet-zout grensvlak wordt op basis van de metingen geschat op 2-3 m. De uitgevoerde handmetingen van de EC bevestigen de diepte ligging van het grensvlak met gemeten waarden van 1.5 en 7.8 mS/cm op respectievelijke dieptes van 2.5 en 5 m. Deze metingen zijn uitgevoerd net in het verlengde van profiel B7-1-3.



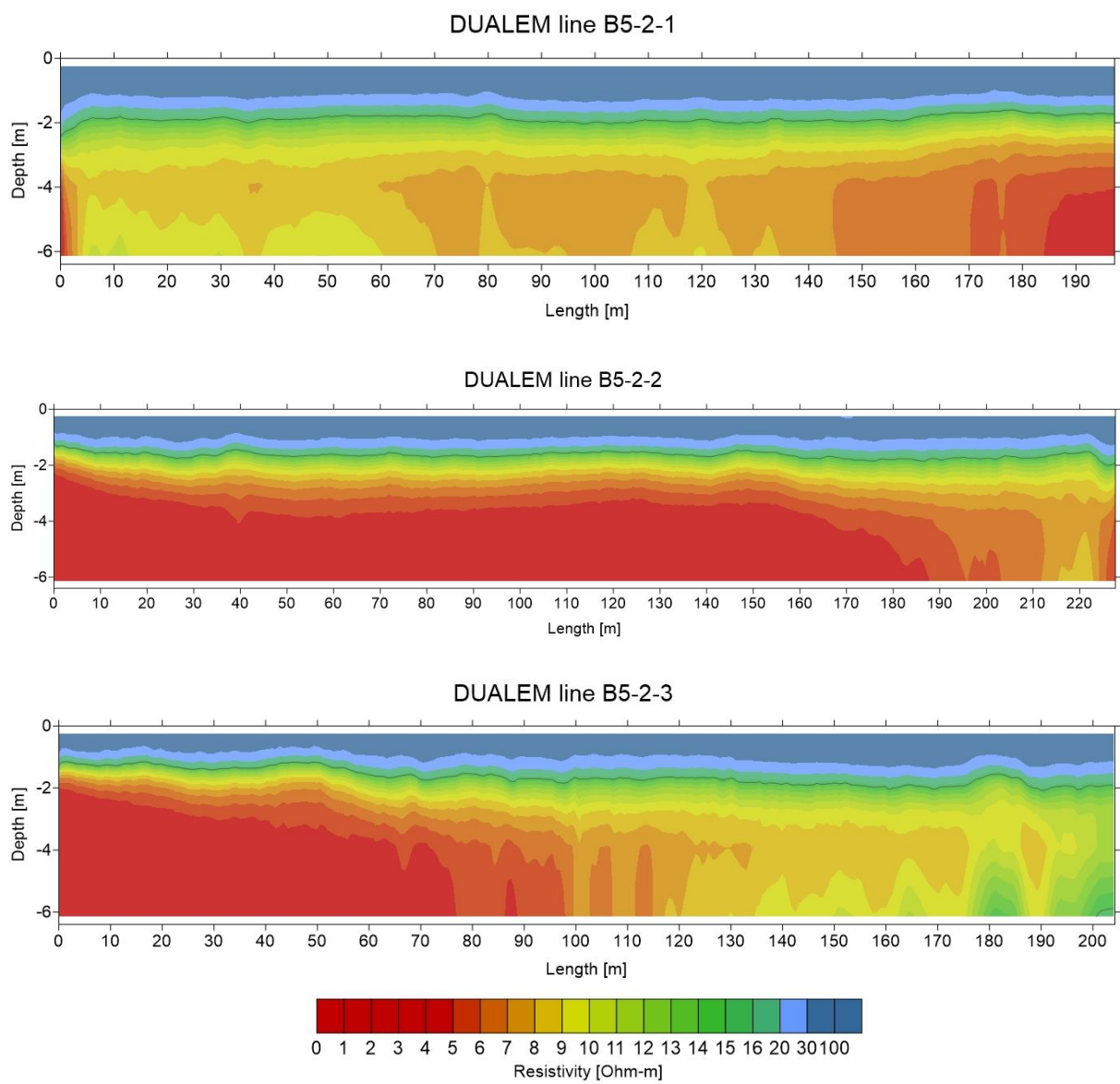
Figuur 47. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B7-1.

## B5-2



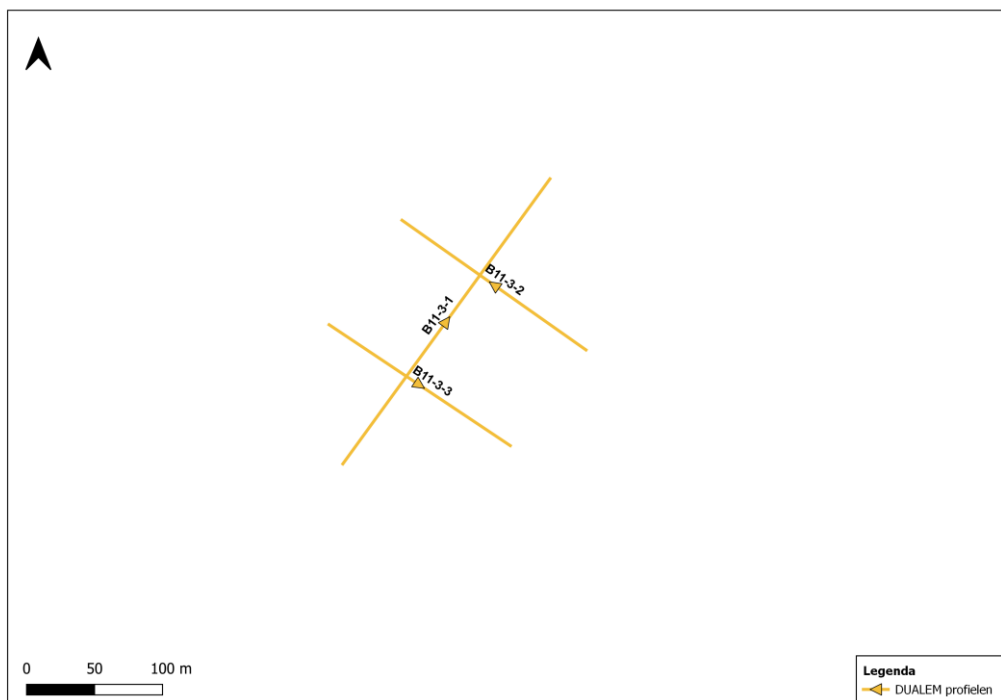
Figuur 48. Meetlocaties voor cluster B5-2. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Het perceel op locatie B5-2 heeft een homogene en zandige bodem en is daardoor toegewezen aan bodemcluster 5. Ondanks het zandige karakter van de bodem zijn de gemeten weerstanden laag, wat duidt op een ondiepe ligging van het zoet-zoutgrensvlak. Op het noordwestelijke deel van het perceel bevindt het grensvlak zich vermoedelijk al op een diepte tussen de 1.5-2 m. In oostelijke richting zakt het grensvlak iets dieper naar ongeveer 2-2.5 m diepte. Over het algemeen, kan er op basis van de metingen worden geconcludeerd dat het zoet-zoutgrensvlak zich op deze locatie relatief ondiep bevindt.



Figuur 49. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B5-2.

## B11-3

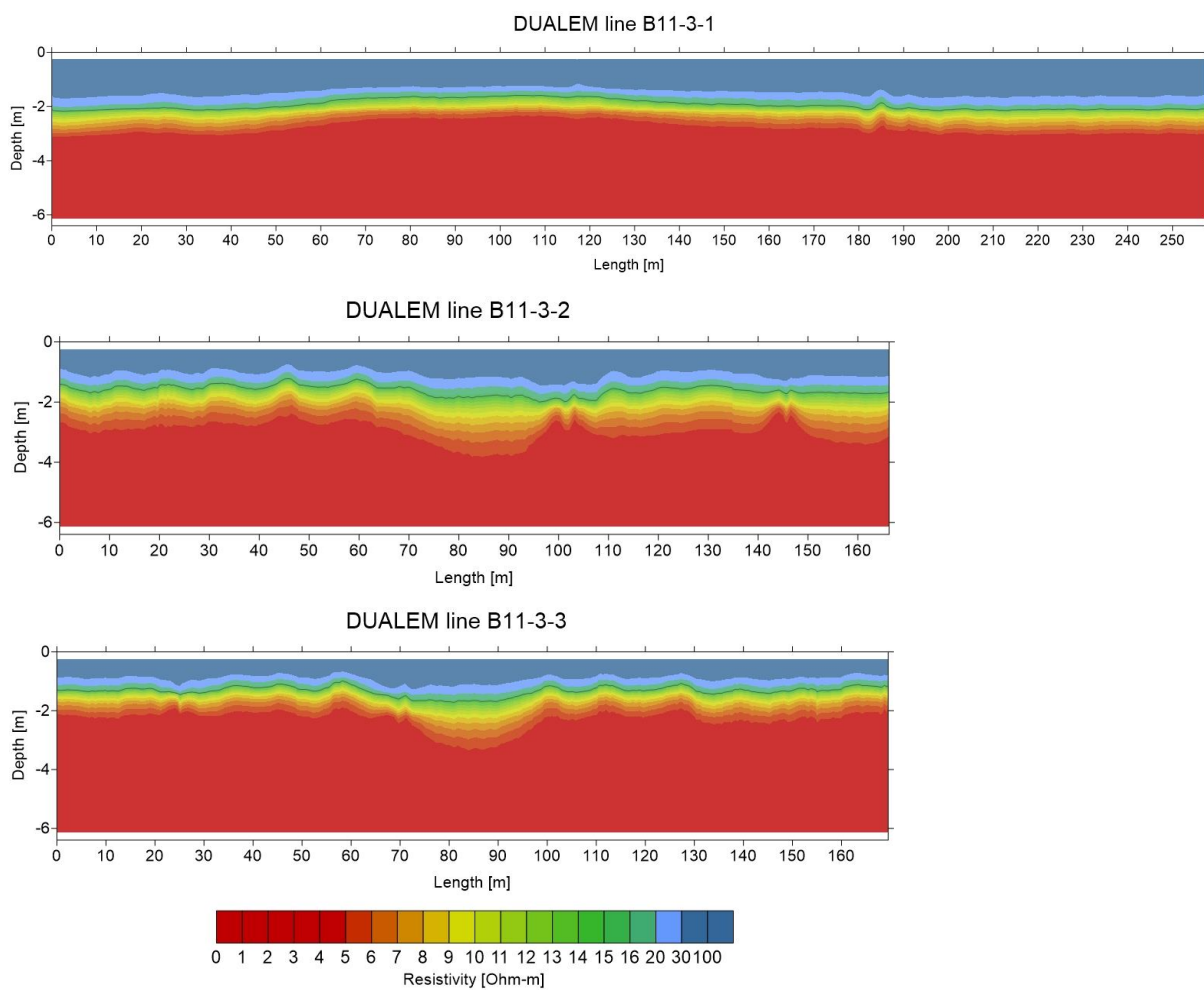


Figuur 50. Meetlocaties voor cluster B11-3. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Locatie B11-3 behoort tot bodemcluster 11, dat wordt gekenmerkt door een zandige bodem met een dunne zavel laag aan de bovenkant van het profiel. De drainage op dit perceel loopt in noordoostelijke richting, waardoor de profielen B11-3-2 en B11-3-3 loodrecht op de drainagemiddelen zijn uitgevoerd. De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Figuur 49.

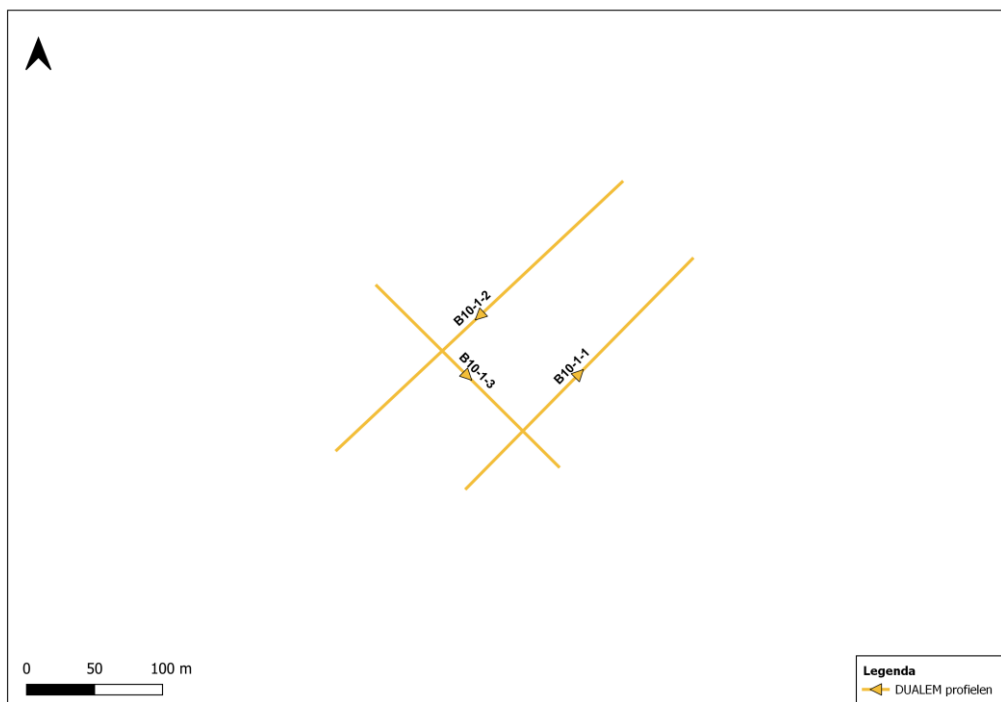
Alle profielen vertonen een duidelijke overgang tussen een hoge weerstand ( $> 30 \text{ Ohm m}$ ) in de ondiepere delen van het profiel en een lage weerstand ( $< 5 \text{ Ohm m}$ ) in de diepere delen. De hoge weerstand ( $> 20 \text{ Ohm m}$ ) in de bovenste laag duidt op een laag bodemvochtgehalte en/of aanwezigheid van zoet grondwater. De scherpe overgang in weerstand wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van kwel en een sterke toename van het zoutgehalte. Deze scherpe overgang wijst erop dat het zoet-zoutgrensvlak hier naar verwachting tussen de 2-2.5 m diepte ligt.

De aanwezigheid van kwel op dit perceel wordt tevens weerspiegeld in de resultaten van de profielen B11-3-2 en B11-3-3. Op bepaalde locaties is de positie van de drainage duidelijk zichtbaar doordat er zout omhoog komt in de richting van de drainagemiddelen, die zich op een diepte van 1.30 m bevinden. Dit proces leidt tot de vorming van zoetwaterlenzen.



Figuur 51. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B11-3.

## B10-1

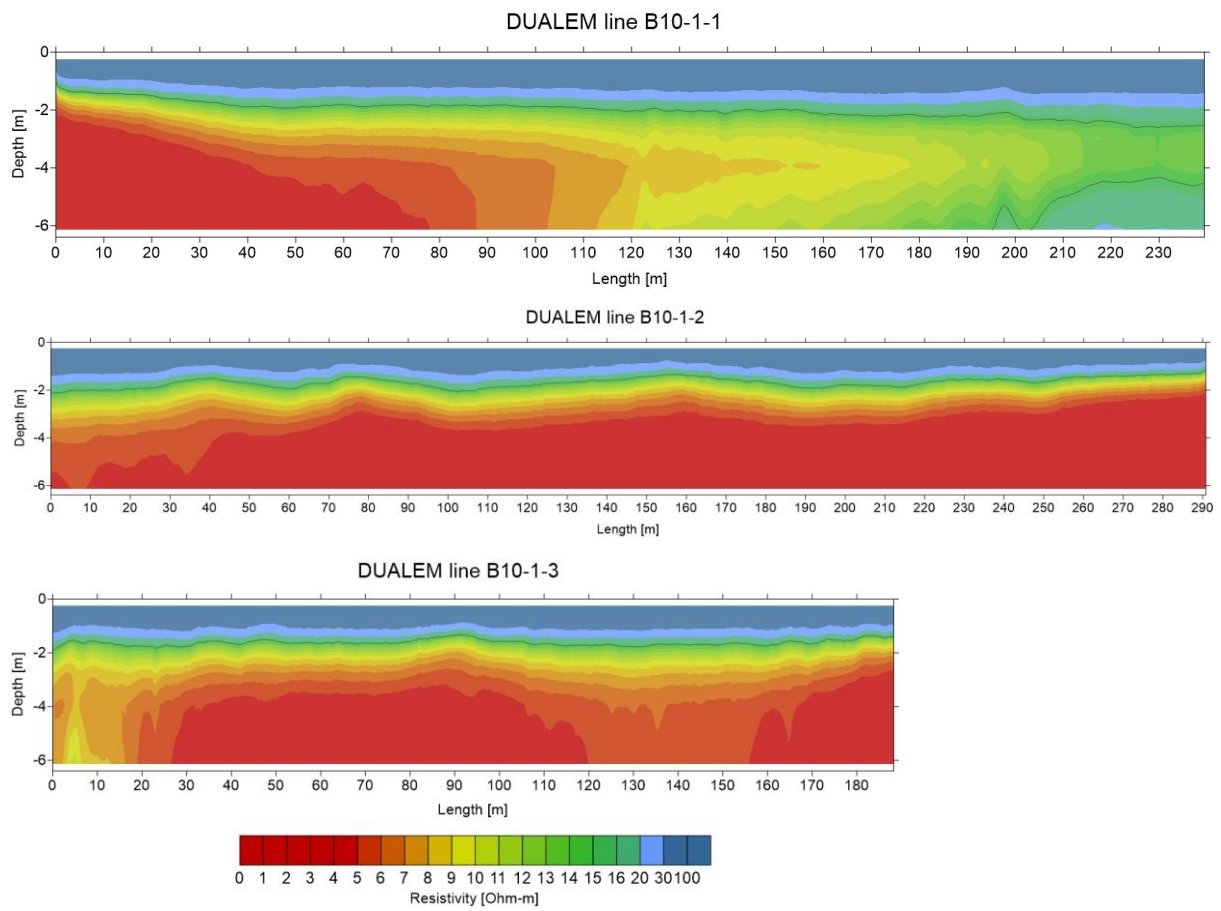


Figuur 52. Meetlocaties voor cluster B10-1. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Locatie B10-1 is toegewezen aan bodemcluster 10, wat betekent dat de bodem voornamelijk bestaat uit zand, met twee dunne zavelagen boven en onder in het profiel. De drainage bevindt zich op een diepte van 1,50 m en loopt af in zuidwestelijke richting.

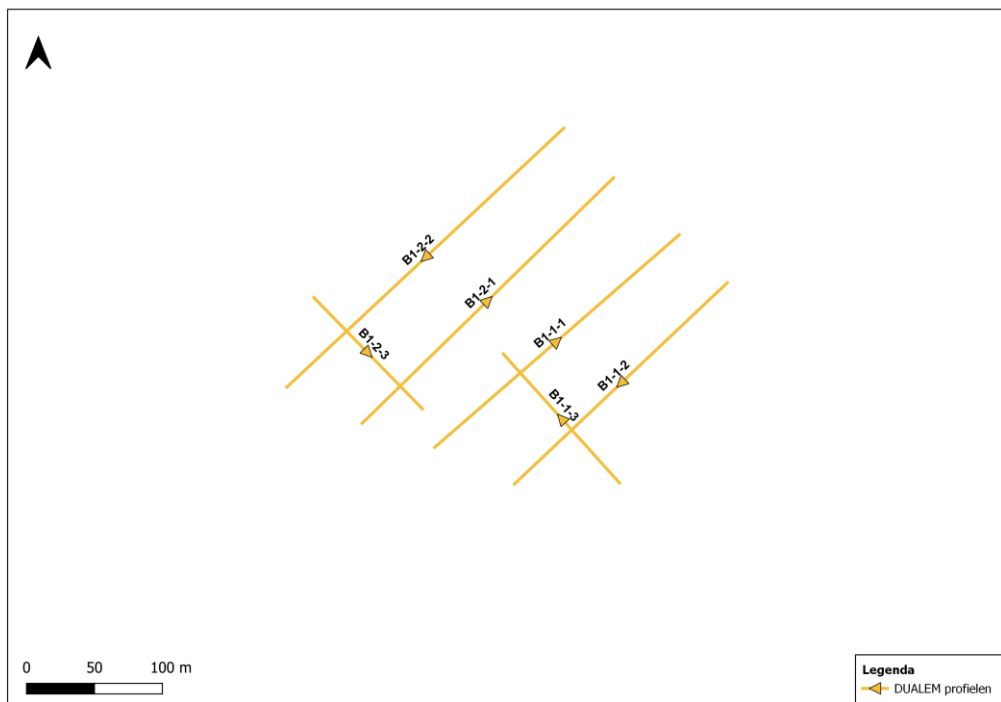
De resultaten laten zien dat de weerstanden het laagst zijn aan de zuidkant van het perceel (Figuur 39). Ondanks de toewijzing aan de laagste kwelklasse, tonen weerstanden van minder dan 5 Ohm m aan dat het grondwater op een groot deel van het perceel brak is. Naar het noordoosten toe nemen de weerstanden iets toe, wat naar verwachting samengaat met een afname van het zoutgehalte en een overgang van brak naar lichtbrak grondwater. De diepte van het zoet-zoutgrensvlak wordt geschat op ongeveer 2 tot 2,5 m. Dit komt overeen met de gemeten EC-waardes van 4.1 en 27.4 mS/cm op respectievelijke dieptes van 2.5 en 5.5 m (Antea, april 2023). Aan de zuidkant van het perceel lijkt het grensvlak zich zelfs minder dan 2 m onder het maaiveld te bevinden.





Figuur 53. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B10-1.

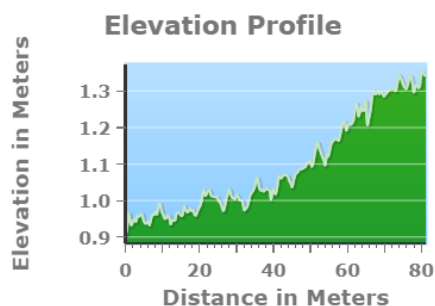
## B1-2



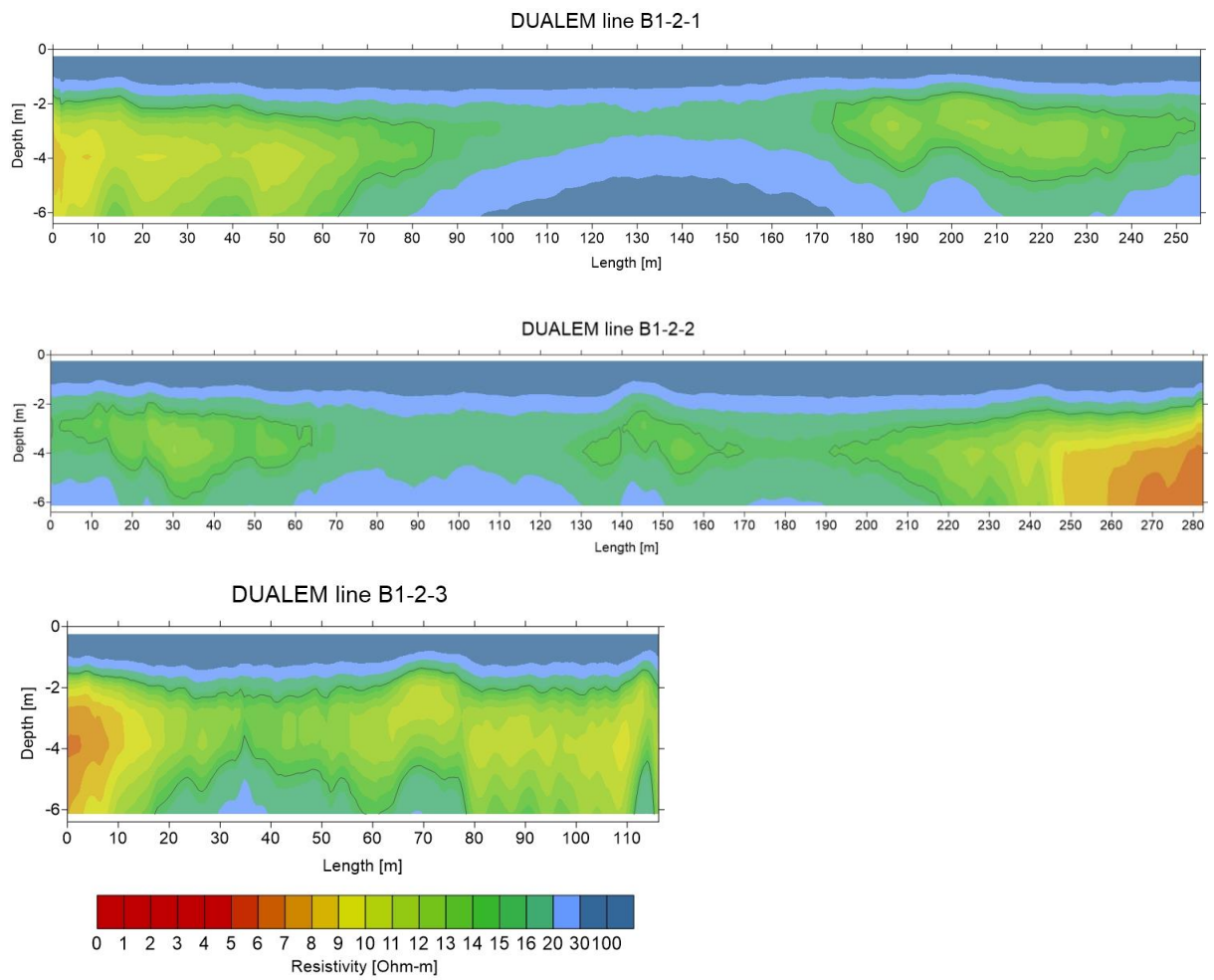
Figuur 54. Meetlocaties voor cluster B1-2. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Locatie B1-2-2 behoort tot bodemcluster 1 dat gekenmerkt wordt door een zavelige bodem met een diepere zandlaag. De drains liggen op 1 m diepte en lopen in westelijke richting. De resultaten van de DUALEM-metingen worden weergegeven in Figuur 40.

Over het algemeen zijn de gemeten weerstanden hoog. Dit wil zeggen dat het grondwater hier op de meeste locaties zoet tot lichtbrak is tot ten minste 6m diepte. Enkel in de zuidwestelijke hoek van het perceel nemen de weerstanden af tot onder de 8 Ohm m. Dit kan worden verklaard door het aanzienlijke hoogteverschil in het maaiveld binnen dit perceel. De zuidwestelijke hoek ligt circa 30-40 cm lager (Figuur 55). Logischerwijs is de kwelflux en dus het zoutgehalte op dit deel van het perceel het hoogst, wat resulteert in lagere weerstanden vergeleken met de rest van het perceel. In deze lager gelegen hoek ligt het zoet-zout grensvlak op  $\pm 2-2.5$  m diepte. Op andere delen van het perceel werden weerstanden groter dan 20 Ohm m gemeten op 6 m diepte. Dit toont aan dat hier zoet tot lichtbrak grondwater aanwezig is.

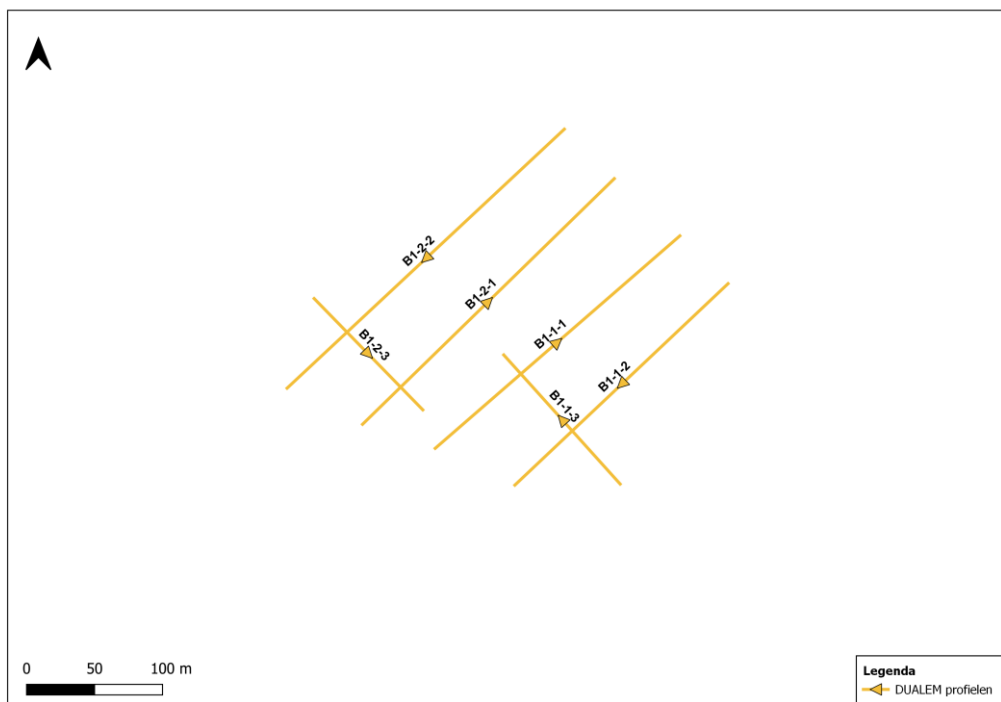


Figuur 55. Verloop in het perceel (bron: AHN).



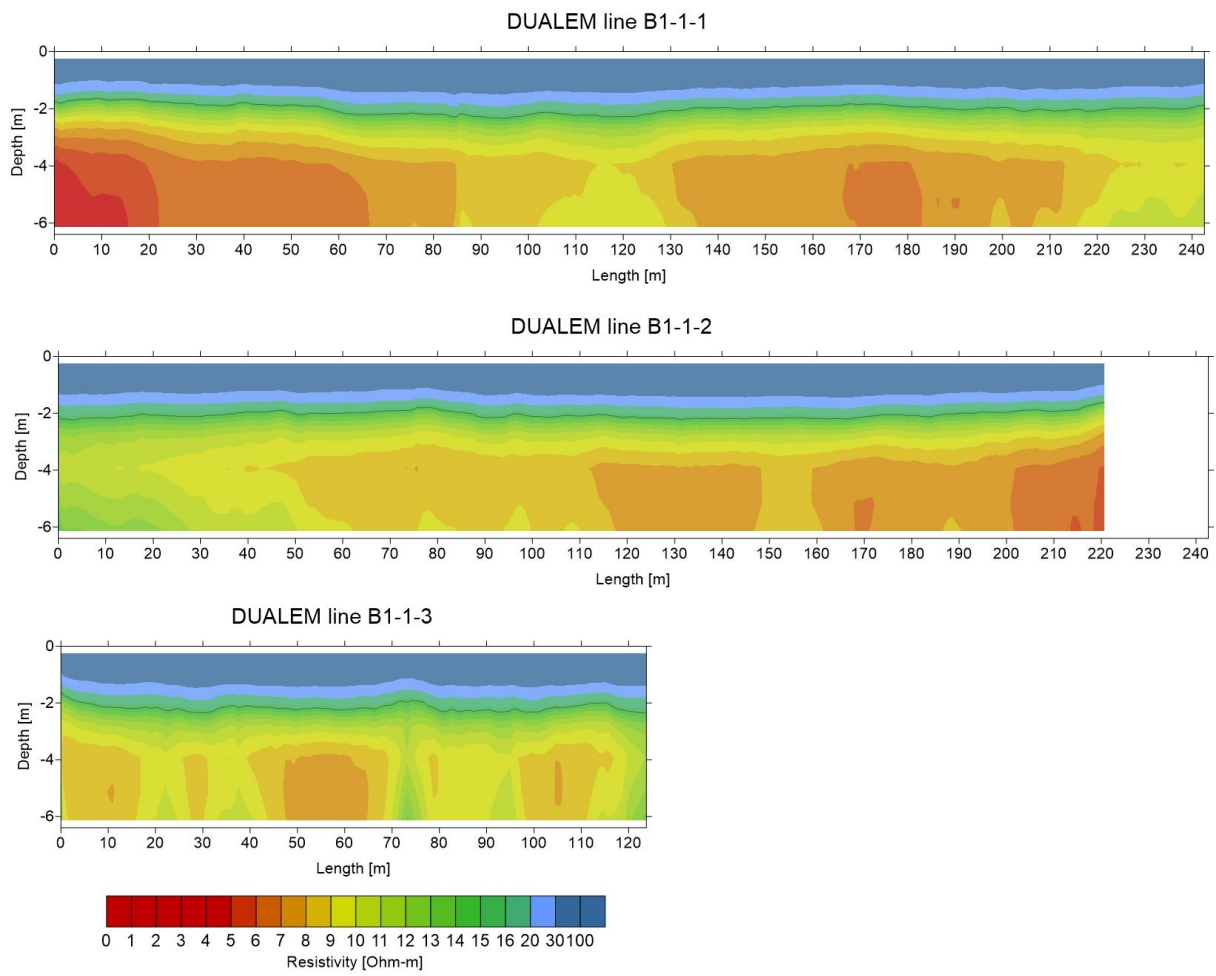
Figuur 56. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B1-2.

## B1-1



Figuur 57. Meetlocaties voor cluster B1-1. De pijlen geven de richting aan waarin de profielen zijn gelopen.

Locatie B1-1-1 behoort ook tot bodemcluster 1. Volgens de kwelclassificatie heeft dit perceel echter een lagere kwelflux in vergelijking met het aangrenzende perceel. Ondanks de toekenning aan een lagere kwelklasse, zijn de gemeten weerstanden niet hoger dan die op het aangrenzende perceel. De lagere weerstanden kunnen worden veroorzaakt door een hoger zoutgehalte of een hoger kleigehalte. In het grootste deel van de profielen werd een weerstand gemeten variërend van 6 tot 11 Ohm m vanaf een diepte van 2,5-3 m. Aangezien er sprake is van een zavelige bodem, lijkt het erop dat het grondwater vanaf een diepte van 2,5-3 m lichtbrak is. Naar het zuidwesten van het perceel neemt de weerstand tussen 4-6 m diepte af tot minder dan 5 Ohm m, wat erop wijst dat het grondwater hier, ongeacht het bodemtype, brak is.



Figuur 58. Resultaten van de DUALEM-profielen van cluster B1-1.

## 5 Conclusie

Uit het DUALEM onderzoek is gebleken dat de percelen langs het tracé gekenmerkt worden door een variërende diepteligging van het zoet-zout grensvlak. Deze variatie in grensvlakdiepte is zelfs merkbaar binnen percelen, zoals bij locatie B3-1, waar het grensvlak aan de noordkant op een diepte van ongeveer 2-3 meter ligt en aan de zuidkant op meer dan 6 meter diepte. Ook zijn er aanzienlijke verschillen tussen aangrenzende percelen, bijvoorbeeld tussen locaties B8-1 en B5-1. Deze resultaten benadrukken de heterogeniteit van de kweldruk in het gebied en daarmee de ruimtelijke verschillen in het risico op verzilting.

Bovendien is gebleken dat er onzekerheden zitten in de huidige kwelkaarten (MIPWA, LHM, Acacia Water) en daarmee in de kwelclassificatie van de standaardprofielen. Bijvoorbeeld bij standaardprofiel B5-1 - waar op basis van de kwelgegevens een lage kwelflux werd verwacht - lag het zoet-zout grensvlak toch op 1.5-2.5 m diepte. Opmerkelijk genoeg werd bij B5-3 de ligging van het grensvlak op een diepte groter dan 6 m (buiten meetbereik) geschat, terwijl het standaardprofiel is toebedeeld aan de hoogste kwelklasse. Vanwege deze onzekerheid zal in het vervolgonderzoek de kwelparameter worden meegenomen in de gevoeligheidsanalyse van de modelstudie.

## 6 Referenties

- Antea Group. (2023). *Bodemonderzoeken t.b.v. verziltingsstudie: NOZ - TNW Ten Noorden van de Wadden Eemshaven West*.
- Archie, G. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. . *Petroleum Transactions of AIME* , 146: 54–62.
- Mulder, J., & Spoelstra, J. (1995). *Een geohydrologische systeembeschrijving van het noordelijke deel van het herinrichtingsgebied Bergen-Schoorl Wageningen*, . SC-DLO, Rapport 325.
- Stuyfzand, P. (1987). *A very accurate calculation method of the electrical conductivity of water: version 2*. Kiwa report SWE 87.006.

**Hoofdkantoor**

Van Hogendorpplein 4  
2805 BM Gouda

**Regiokantoor  
Noord-Nederland**

Watercampus  
Agora 4  
8934 CJ Leeuwarden

**Regiokantoor  
Oost-Afrika**

Woreda 03, Bole Sub city  
House No. 4/020  
Addis Abeba

[www.acaciawater.com](http://www.acaciawater.com)

17 juni 2024





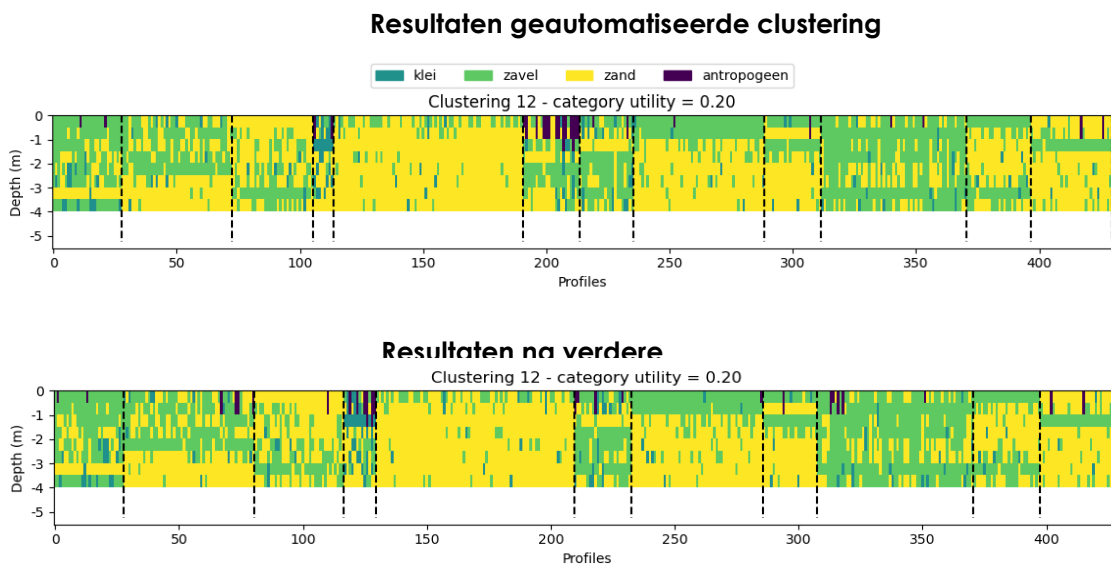
## Bijlage 3 – Clustering

De Category Utility (CU) van een bepaalde clustering is een numerieke waarde die aangeeft hoe goed een clustering van categorische data is. Het probeert zowel de kans te maximaliseren dat twee objecten in dezelfde categorie attribuutwaarden gemeen hebben, als de kans dat objecten uit verschillende categorieën verschillende attribuutwaarden hebben. De formule van de CU wordt hieronder getoond:

$$CU(C) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} P(C_k) \left[ \sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij} | C_k)^2 - \sum_i \sum_j P(A_i = V_{ij})^2 \right]$$

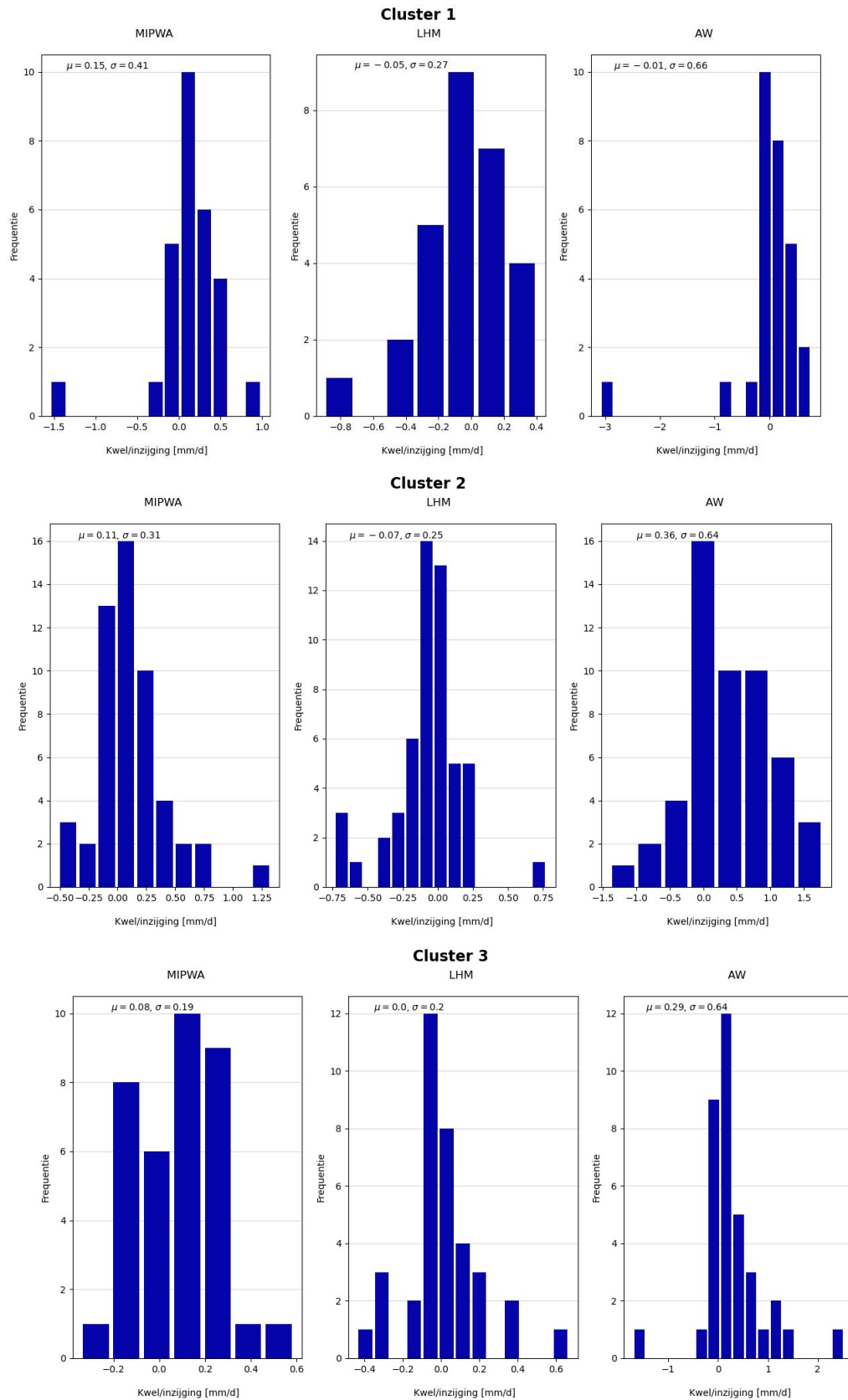
In de vergelijking is C een clustering, A een attribuut, zoals in dit geval 'bodemtype', en V is een waarde, zoals 'zand'. De kleine letter k is een indexvariabele voor elk unieke cluster. De kleine letter m geeft het aantal clusters weer. Voor een uitgebreide uitleg van de functie zie Mirkin (2001).

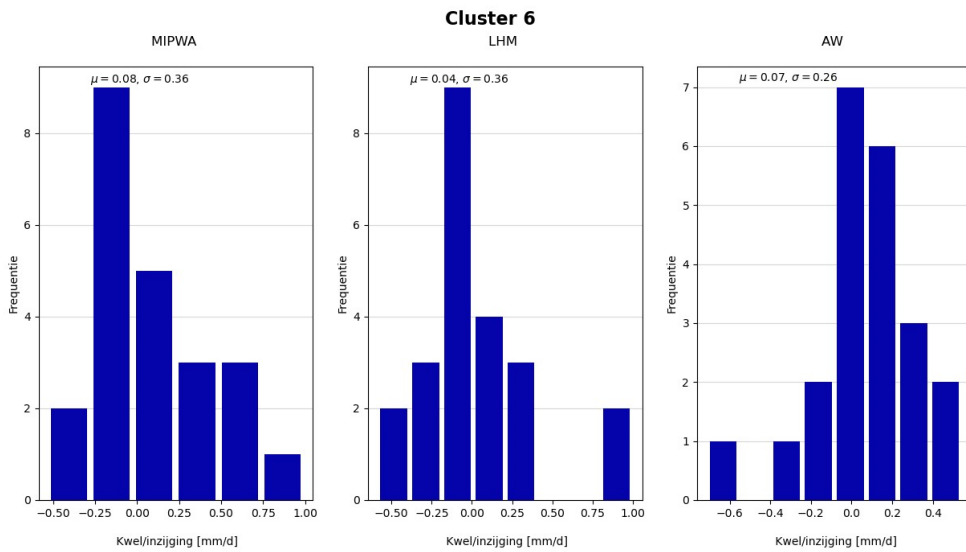
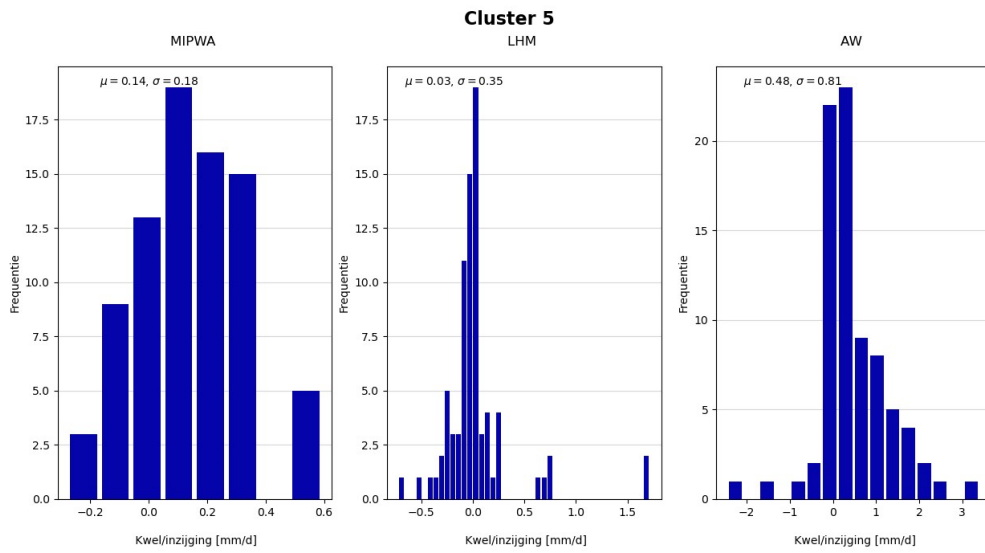
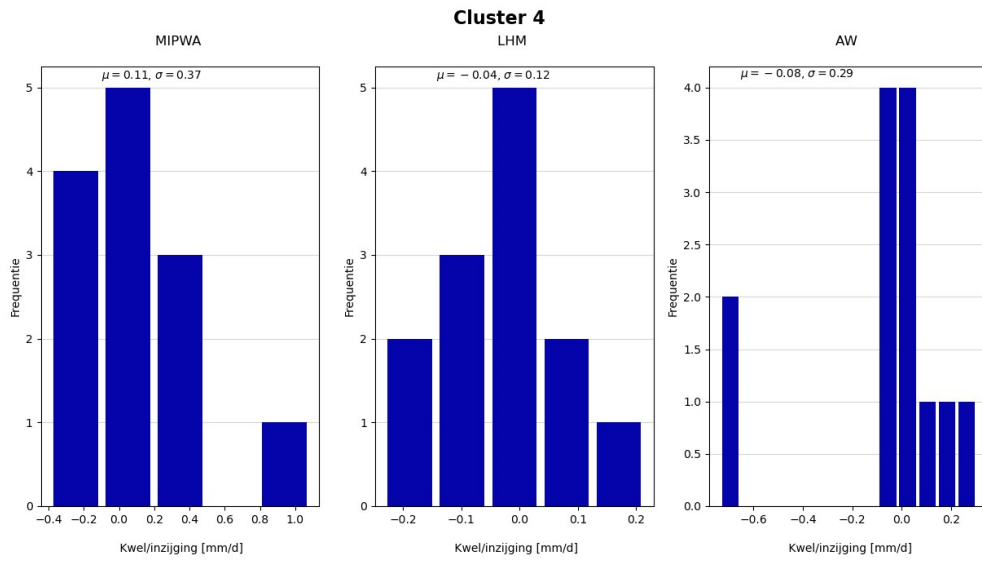
Figuur 22 laat de resultaten van de uitgevoerde clustering te zien. Per cluster worden alle bijbehorende bodemprofielen getoond. Na uitvoering van de automatische clustering, zijn de resultaten verder aangepast o.b.v. 'expert judgement'. Bodemprofielen met antropogene lagen zijn bijvoorbeeld niet toegekend aan een aparte cluster, maar verdeeld over de andere clusters (Figuur 22). De profielen met antropogene lagen zijn namelijk vaak punten vlak langs de dijk. Door de 100m resolutie van GeoTOP vallen deze punten binnen dezelfde pixel als de dijk (Figuur 22, links), maar in de realiteit liggen ze op de percelen (Figuur 22, rechts). Aangezien het onderzoek focust op het verziltingsrisico op perceel niveau, is er gekeken naar de bodemopbouw van de omliggende pixels (van het specifieke perceel) en zijn de punten op basis hiervan toegekend aan het meest representatieve cluster.

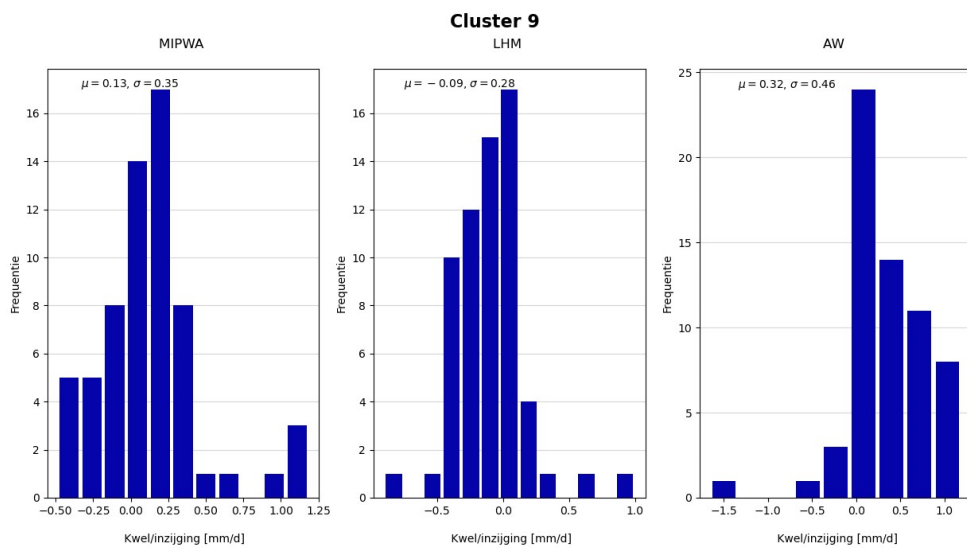
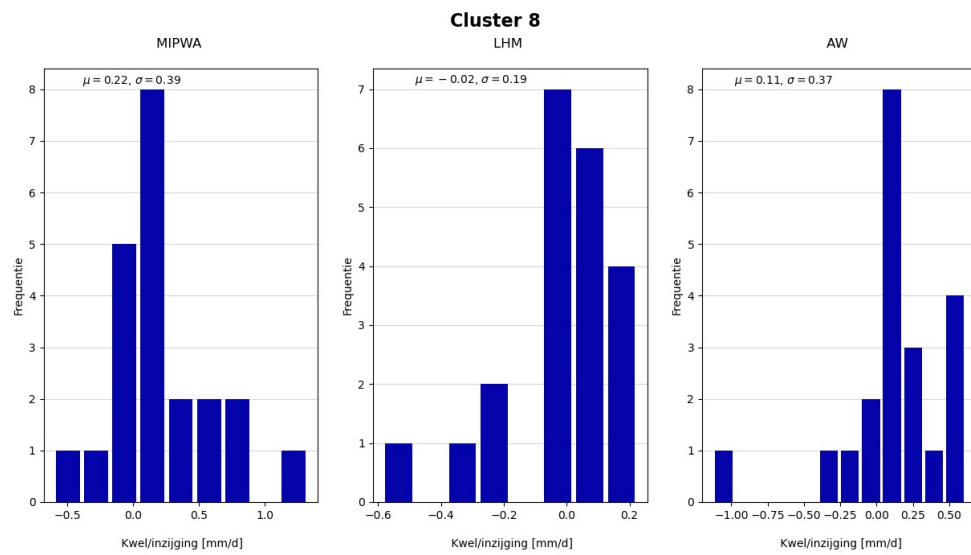
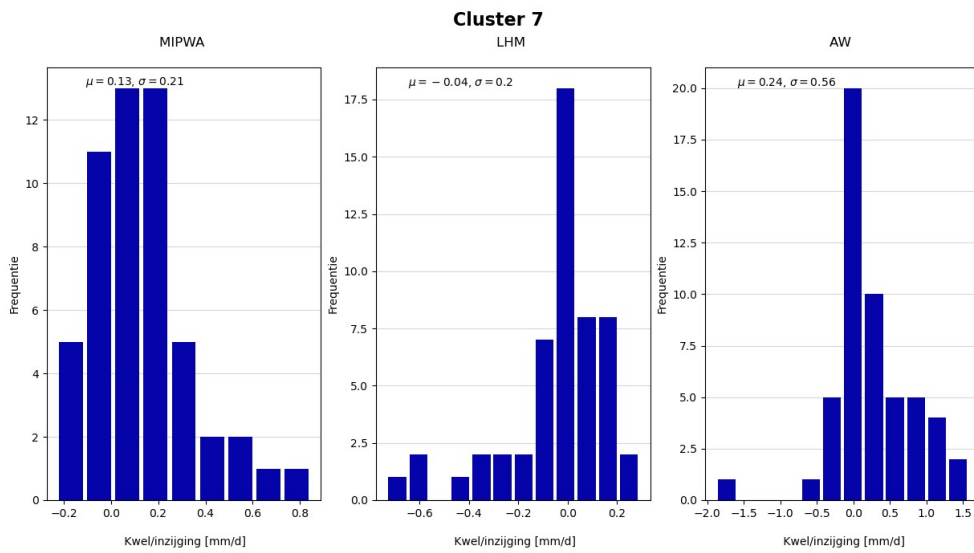


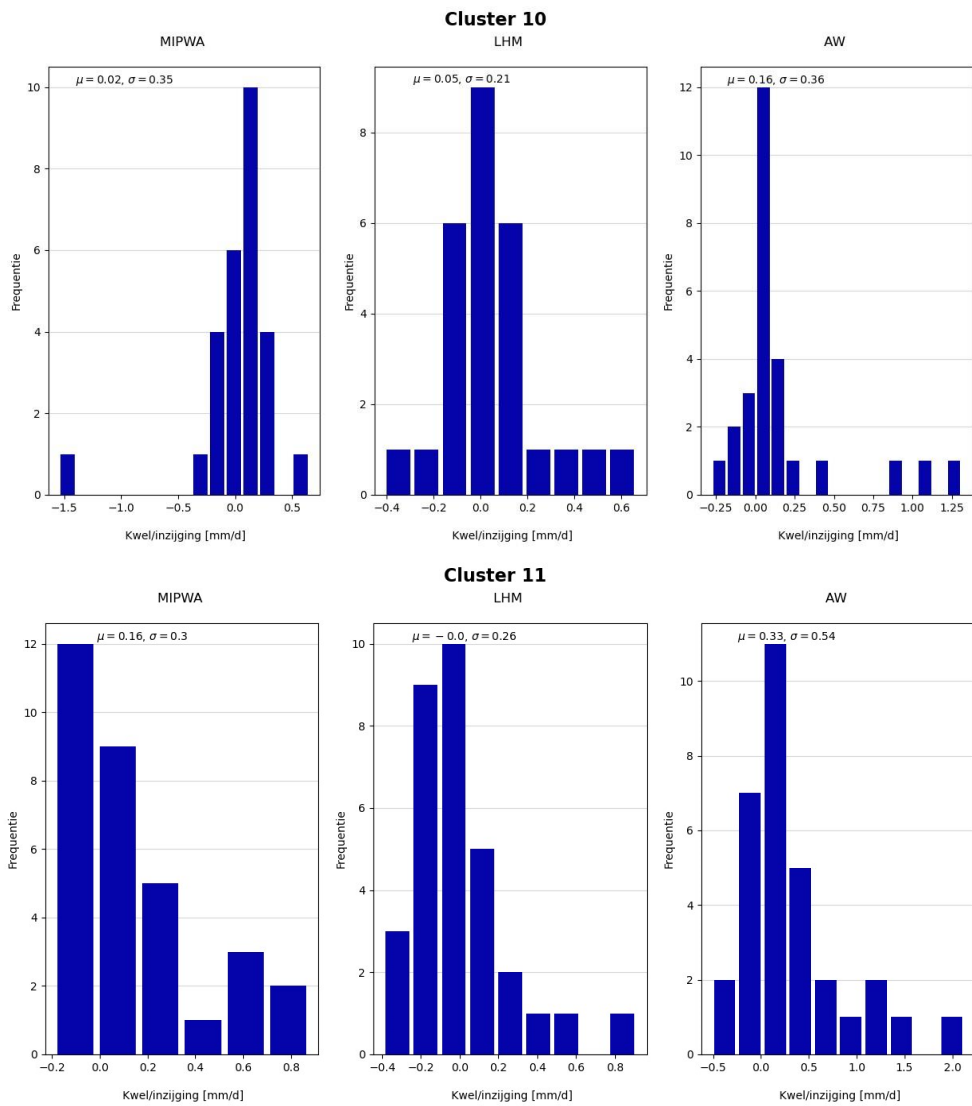
Figuur 22: Resultaten van de geselecteerde clustering van de 430 bodemprofielen langs het tracé. Na de automatische clustering (boven) zijn er verdere aanpassingen gedaan op basis van expert judgement (onder).

# Bijlage 4 – Vergelijking kwel clusters









# Bijlage 5 – Drainage enquête

## Inleiding


Met het verziltingsonderzoek willen Acacia Water, LTO Noord, EZK en TenneT gezamenlijk de mogelijke verziltingseffecten van de aanleg van elektriciteitskabels richting Eemshaven onderzoeken. Voor het onderzoek zijn gegevens over de drainagesituatie van de percelen cruciaal. Deze enquête is bedoeld om deze gegevens op te halen over de percelen die in de buurt van het tracé liggen. De opgehaalde informatie wordt zonder nadrukkelijke toestemming van u niet voor andere doeleinden dan dit verziltingsonderzoek gebruikt. Als Acacia Water naar aanleiding van de enquête aanvullende vragen heeft, dan nemen zij contact met u op.

Klik op de kaart op een eigen perceel langs het tracé en vul enkele vragen in over dat perceel. Mochten de eigenschappen variëren binnen het perceel, houdt u bij de antwoorden dan rekening met dat deel van het perceel waar het tracé wordt aangelegd (grof aangegeven in paars). Maak vervolgens een nieuwe kaart aan voor het volgende perceel langs het tracé en voer dezelfde stappen uit tot al uw percelen langs het tracé zijn opgenomen in het formulier.

Heeft u een vraag over het invullen van de enquête, dan kunt u donderdag 30 december of dinsdag 4 januari bellen naar 06-11286594.

Wij begrijpen dat u inspanningen zult moeten verrichten om mee te werken aan deze enquête. Graag willen wij u dan ook eenmalig voor uw inspanningen compenseren, met een vergoeding van 200 Euro per volledig ingevulde en bruikbare enquête.

Perceelgegevens invoeren [?]



DRAINDIEPTE HUIDIGE DRAINAGE:	<input type="text"/>	cm beneden maaiveld
AFSTAND TUSSEN DRAINAGEBUIJZEN HUIDIGE DRAINAGE:	<input type="text"/>	m
AFWATERINGSRICHTING VAN DE DRAINAGE:	<input type="text"/>	▼
IS HET PERCEEL HERGEDRAINEERD?	<input type="text"/>	▼

Opmerking herdrainage: Oude drainage kan nog van invloed zijn op ontwatering en verzilting in een perceel.  
Dit is niet altijd goed bekend, maar globale informatie is voor ons ook belangrijk om te weten voor de bepaling van effecten.

ALS PERCEEL IS HERGEDRAINEERD, DRAIN DIEPTE OUDE DRAINAGE: <input type="text"/> cm beneden maaiveld (als niet van toepassing, laat vakje leeg)
ALS PERCEEL IS HERGEDRAINEERD, AFSTAND TUSSEN DRAINAGEBUIZEN OUDE DRAINAGE: <input type="text"/> m (als niet van toepassing, laat vakje leeg)
ALS PERCEEL IS HERGEDRAINEERD EN DE AFSTAND TUSSEN DE DRAINAGEBUIZEN IS GELIJK GEBLEVEN, ONDERLINGE AFSTAND VAN HUIDIGE EN OUDE DRAINAGE: <input type="text"/> m (als niet van toepassing, laat vakje leeg)
Globale bouwplan: <input type="text" value="bijv. 'aardappelen-graan-ui'"/>
Overige opmerkingen: <input type="text"/>

[Klik hier om een nieuwe kaart te openen voor percelen met andere gegevens.](#)

NAAM:	<input type="text"/>
ADRES:	<input type="text"/>
POSTCODE:	<input type="text"/>
PLAATSNAAM:	<input type="text"/>
TELEFOON:	<input type="text"/>
E-MAIL:	<input type="text"/>
BANKREKENINGNUMMER (IBAN):	<input type="text"/>

[Klik hier om het formulier op te sturen](#)

**Hoofdkantoor**

Van Hogendorpplein 4  
2805 BM Gouda

**Regiokantoor  
Noord-Nederland**

Watercampus  
Agora 4  
8934 CJ Leeuwarden

**Regiokantoor  
Oost-Afrika**

Woreda 03, Bole Sub city  
House No. 4/020  
Addis Abeba

[www.acaciawater.com](http://www.acaciawater.com)

