

Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord- Nederland

Eindrapport 18/7/2011



Kennis programma Klimaat voor Ruimte

18/7/2011

Eindrapport

Projectnummer N20090333

Documenttitel	Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland
Status	Eindrapport
Datum	18/07/2011
Projectnaam	
Projectnummer	N20090333
Opdrachtgever	Kennis programma Klimaat voor Ruimte
Referentie	

Auteur(s)	Goswin van Staveren, Jouke Velstra
Collegiale toets	Koos Groen
Datum / Paraaf	23 maart 2012 B/A 
Vrijgegeven door	Arjen de Vries
Datum / Paraaf	23 maart 2012 

INHOUDSOPGAVE

Inhoudsopgave	ii
Lijst met figuren.....	iv
1 Inleiding, kader en doelstelling	1
1.1 Inleiding.....	1
1.2 Kader hoofdonderzoek	1
1.3 Doelstelling.....	2
1.4 Afbakening	3
1.5 Leeswijzer	3
2 Achtergrond.....	5
2.1 Verzilting in Nederland	5
2.2 Historische ontwikkeling van gebied.....	6
2.3 Zoetwaterlenzen en grondwatersystemen.....	8
2.4 Klimaatverandering en autonome ontwikkelingen	11
3 Verziltingspoor opbouw en inventarisatie.....	13
3.1 Inleiding.....	13
3.2 Opbouw verziltingsonderzoek.....	13
3.3 Keuze veldonderzoekpercelen	14
3.3.1 Criteria voor selectie percelen	14
3.3.2 Resultaat inventarisatie	15
3.3.3 Analyse gegevens	20
3.3.4 Theoretische Perceelstypen	21
3.4 Veldonderzoekpercelen	21
3.5 Percelen continuumetingen.....	22
4 Veldonderzoek	24
4.1 Inleiding en doel veldonderzoek	24
4.2 Opzet veldonderzoek	24
4.3 Veldonderzoekmethoden	25
4.4 Werkwijze perceelsmetingen	29
4.5 Interpretatie resultaten veldonderzoek.....	32
4.5.1 Interpretatie CVES	32
4.5.2 Verificatie CVES-metingen	35
4.6 Resultaten CVES-metingen	37
4.6.1 Kwelpercelen en infiltratiepercelen.	37
4.6.2 Effect van drainagebuizen	39
4.6.3 Greppels en drains	42

4.6.4	Het krimpen van de zoetwaterlens	42
4.6.5	Zout boven de drains	44
4.6.6	Ongerijpte grond	46
4.7	Discussie en conclusies	47
5	Opschaling	49
5.1	Inleiding.....	49
5.2	Opzet.....	50
5.3	Model.....	50
5.3.1	Uitgangspunten	50
5.3.2	Parametrisatie en calibratie verzadigde zonemodellen	51
5.3.3	Gevoeligheid modeluitkomsten	58
5.3.4	Conclusies calibratie en gevoeligheidsanalyse	59
5.4	Parametrisatie onderzoeksgebied Noord-Nederland.....	60
5.4.1	Inperking onderzoeksgebied.....	60
5.4.2	Kwel.....	60
5.4.3	Bodemopbouw.....	61
5.4.4	Doorlatendheid	61
5.4.5	Modelruimte.....	63
5.5	Basismodellen & modellendatabank	63
5.6	Resultaten berekeningen	65
6	Verziltingsrisicokaart	68
6.1	Criteria.....	68
6.2	Verziltingsrisicokaart huidige situatie	69
6.2.1	Resultaat	69
6.2.2	Verificatie verziltingsrisicokaart aan veldonderzoek	70
6.3	Verziltingskaart toekomstige situatie.....	73
6.3.1	Uitgangspunten	74
6.3.2	Modelresultaat en criteria.....	75
6.3.3	Resultaat	76
6.4	Modelresultaten onverzadigde zonemodellen.....	77
6.4.1	Uitgangspunten	77
6.4.2	Resultaten	79
6.5	Conclusies en aanbevelingen.....	83
6.5.1	Conclusies.....	83
6.5.2	Kanttekeningen en nuanceringen:.....	83
6.5.3	Aanbevelingen.....	84
7	Referenties	85
	Bijlage 1. CVES-metingen: factsheets.....	
	Bijlage 2. Veldonderzoekmethoden	

Lijst met figuren

Figuur 1.1: De drie onderzoekssporen, de resultaten en de synthese met conclusies en oplossingsrichtingen	2
Figuur 2.1: Links Nederland 1150 jaar geleden (RACM&TNO), midden inpolderingen sinds 1300 (Atlas van Nederland) en rechts het zoutgehalte tot ca. 20m diepte (TNO)....	5
Figuur 2.2: (a) Diepte van het Pleistoceen dat overeenkomt met de basis van het Holoceen. (b) doorsnede over het gebied met daarin aangegeven de verschillende bodemeenheden. (c) De verschillende landschappelijke structuren in het zeekleigebied (Roeleveld en Griede, 1982)	7
Figuur 2.3: Links de situatie omstreeks 800 na Chr. Rechts de diepte van het zoet-zout grensvlak ten opzichte van maaiveld.	8
Figuur 2.4: Schematische weergave van een neerslaglens in stationaire toestand met constante kwel en neerslagoverschot (aangepast naar Raat, 1999).	10
Figuur 2.5: Verandering in de temperatuur, neerslag en verdamping, volgens het KNMI '06 W+ scenario (uit Lenderink, 2006).....	12
Figuur 3.1: Fasering verziltingsonderzoek	14
Figuur 3.2: Dikte deklaag (m) in aandachtsgebied.....	15
Figuur 3.3: Voorkomen van zand in diepte interval 0 tot 1 meter onder maaiveld.....	16
Figuur 3.4: Verdeling van drooglegging per provincie.....	16
Figuur 3.5: Diepte zoet-zout grensvlak op basis van VES-metingen.	17
Figuur 3.6: Drainafstand gerapporteerd door deelnemers enquête.....	18
Figuur 3.7: Drainediepte gerapporteerd door deelnemers enquête	18
Figuur 3.8: Kwelkaart (stationaire situatie) volgens het MIPWA model	19
Figuur 3.9: Vereenvoudigde bodemkaart.....	20
Figuur 3.10: Locaties percelen veldonderzoek Noord-Nederland	22
Figuur 4.1: Schematische weergave van de meetopstelling van een VES (links) en de resulterende interpretatie in een lagenmodel (rechts)	26
Figuur 4.2: Meetopstelling CVES	26
Figuur 4.3: Invloed bodem en grondwatereigenschappen op geleidbaarheid en weerstand.	27
Figuur 4.4: Overzicht metingen op een perceel.	29
Figuur 4.5: Ligging van de drains en CVES profiel perceel 4, Herbaijum	30
Figuur 4.6: Continu meetopstelling over de raai van de CVES op perceel Herbaijum	31
Figuur 4.7: Ligging van de drains en CVES profiel perceel 11, Rottum.....	31
Figuur 4.8: Continu meetopstelling over de raai van de CVES op perceel Rottum	32
Figuur 4.9: CVES resultaat. Weerstand ondergrond perceel 6, Langrousterwei Oosternijkerk.....	33
Figuur 4.10: Berekend chloridegehalte van CVES-profiel perceel 6	35
Figuur 4.11: Geleidbaarheidsprofielen van CVES en met prikstokmetingen vergeleken voor perceel 1, Sexbierum (links) en perceel 12, Anjum (rechts).....	35

Figuur 4.12: Weerstandsprofielen in de diepte vanaf maaiveld gemeten met CVES (op 19m en 25 m vanaf het begin van de raai) en met de EM39 op	36
Figuur 4.13: Weerstandsmetingen met CVES in april en september; perceel 17 Uithuizen.	37
Figuur 4.14: CVES weerstandsmetingen op perceel 18, Voorrijp.....	38
Figuur 4.15: CVES weerstandsmetingen Rottum tot 9 september	40
Figuur 4.16: Neerslagoverschot Groningen in mm/d (neerslagreeks station Middelstum minus verdampingsreeks van station Eelde)	40
Figuur 4.17: Grondwaterstand en drainageniveau in Rottum.....	41
Figuur 4.18: EC-meting in de drain op perceel Rottum. De onderste grafiek toont de intensiteit van neerslag.....	41
Figuur 4.19: CVES weerstandsmeting, perceel 12, Anjum. Perceel is begreppeld.....	42
Figuur 4.20: CVES weerstandsmetingen gedurende 2010 op perceel 4, Herbaijum	43
Figuur 4.21: Grondwateraanvulling Herbaijum en diepte van de 2000 mg/l contour ten opzichte van maaiveld in het midden van de lens	44
Figuur 4.22: Bovenste meter van CVES weerstandsmeting Niewolda in april en september. De pijlen geven lageweerstandspieken aan boven de grondwaterstand, die geassocieerd worden met capillaire opstijging van zout water.....	45
Figuur 4.23: 'first flush' in EC in drain in perceel Rottum	45
Figuur 4.24: Percelen zonder duidelijk zichtbare zoetwaterlens, waarschijnlijk als gevolg van zeer slecht doorlatende ongerijpte klei.....	46
Figuur 5.1: Lagenopbouw van het basismodel met een slecht doorlatende laag van 2 meter. De bovenste 6 meter onder maaiveld is getoond.....	51
Figuur 5.2: Vergelijking grondwaterstandsmetingen en gesimuleerde grondwaterstanden voor perceel 4, Herbaijum.	53
Figuur 5.3: Vergelijking CVES metingen en gesimuleerde zoet-zout verdeling voor perceel 4, Herbaijum. Opgemerkt zij dat links de gemeten waarden in Ohmm (weerstand) zijn en rechts de gesimuleerde waarden in gram chloride per liter zijn weergegeven. De contourlijn in de weerstandsfiguren correspondeert met de 2000 mg/l contour.	54
Figuur 5.4: Vergelijking metingen geleidbaarheid draineffluent en gesimuleerde geleidbaarheid voor perceel 4, Herbaijum.....	55
Figuur 5.5: Vergelijking grondwaterstandsmetingen en gesimuleerde grondwaterstanden voor perceel 4, Rottum.	56
Figuur 5.6: Vergelijking CVES metingen en gesimuleerde zoet-zout verdeling voor perceel 4, Rottum. Opgemerkt zij dat links de gemeten waarden in Ohmm (weerstand) zijn en rechts de gesimuleerde waarden in gram chloride per liter zijn weergegeven. De contourlijn in de weerstandsfiguren correspondeert met de 2000 mg/l contour.	56
Figuur 5.7: Vergelijking metingen geleidbaarheid draineffluent en gesimuleerde geleidbaarheid voor perceel 11, Rottum.	57
Figuur 5.8: Vergelijking metingen geleidbaarheid draineffluent en gesimuleerde geleidbaarheid voor perceel 11, Rottum voor het hele jaar 2010.	57
Figuur 5.9: verdeling van kwelintensiteit in gebieden met ondiep zout	60

Figuur 5.10: verticaal bodemprofiel van de veldonderzoekpercelen tot aan de zwarte streep. Onder de zwarte streep is de boorbeschrijving van de dichtstbijzijnde DINO-boring.....	61
Figuur 5.11: resultaten doorlatendheidsmetingen geassocieerd naar bodemtype.....	62
Figuur 5.12: aangenomen variatie in kwel en doorlatendheid toplaag voor de modelruns. De kleinste kwelwaarden zijn ten behoeve van de duidelijkheid niet als punt getoond.....	63
Figuur 5.13: conceptueel model perceel Noord-Nederland met relevante parameters.....	64
Figuur 5.14: visuele weergave van het met een perceelsmodel berekende chloridegehalte voor twee tijdstappen in een droge (links) en een natte periode (rechts). De kwel is 0.1 mm/d, de k-waarde toplaag is 0.1 m/d	65
Figuur 5.15: voorbeeld van een automatisch gegenereerde grafiek, voor de situatie kwel = 0.1 mm/d, doorlatendheid = 0.1 m/d, dikte deklaag =2 meter.....	65
Figuur 5.16: modelresultaten minimale dikte zoetwaterlens bij een deklaag van 2 meter	66
Figuur 5.17: modelresultaten minimale dikte zoetwaterlens bij een deklaag van 3 meter	66
Figuur 6.1: beslisdigram voor het bepalen of een combinatie van zoutdiepte, kwel en zwaarte van de bodem leidt tot geen (groen), matig(oranje) of groot (paars) risico leidt.....	68
Figuur 6.2: Verziltingsrisicokaart voor de huidige klimaatsituatie. De paarse kleur indiceert dat een grote kans bestaat dat de zoetwaterlens in een droog jaar verdwijnt; een oranje kleur geeft aan dat de zoetwaterlens mogelijk verdwijnt in een droog jaar. ..	70
Figuur 6.3: weerstandsmetingen van percelen, die volgens de verziltingsrisicokaart verziltten onder droge omstandigheden.	71
Figuur 6.4: correlatie kwel berekend met regionaal MIPWA model ten opzichte van de gemiddelde diepte van het 5000 mg/l grensvlak geobserveerd in de CVES-metingen.....	72
Figuur 6.5: correlaties tussen dikte van de lens en maaiveld, stijghoogte regionaal pakket en polderpeil	73
Figuur 6.6: verandering in de temperatuur, neerslag en verdamping, volgens het KNMI '06 W+ scenario (uit Lenderink, 2006).....	74
Figuur 6.7: modelresultaten dikte zoetwaterlens bij een deklaag van 2 meter voor de toekomstige situatie (W+) met alleen aangepaste grondwateraanvulling. De gestippelde lijnen tonen de resultaten voor de huidige situatie.....	75
Figuur 6.8: beslisdigram voor het bepalen of een combinatie van zoutdiepte, kwel en zwaarte van de bodem leidt tot geen (groen), matig(oranje) of groot (paars) risico leidt. De indeling is op basis van de modelresultaten voor de toekomstige situatie.	76
Figuur 6.9: Verziltingsrisicokaart voor de toekomstige klimaatsituatie. De paarse kleur indiceert dat een grote kans bestaat dat de zoetwaterlens in een droog jaar verdwijnt; een oranje kleur geeft aan dat de zoetwaterlens mogelijk verdwijnt in een droog jaar. ..	76
Figuur 6.10: Voorbeeld van de met SWAP berekende chlorideverdeling (kg/m ³) in de ondergrond in de tijd. De zwarte lijn toont de grondwaterstand die redelijk constant rond drainageniveau blijft.....	79

1 INLEIDING, KADER EN DOELSTELLING

1.1 Inleiding

Het voorliggende deelrapport maakt deel uit van een serie van vier rapporten behorend bij de studie "Klimaatverandering en Toenemende Verzilting en landbouw in Noord-Nederland". De overige rapporten zijn:

- Perceptieonderzoek
- Sociaal-economisch onderzoek
- Synthese

Het project "klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland" maakt deel uit van het BSIK programma Klimaat voor Ruimte (KvR) en wordt uitgevoerd door een breed consortium van kennisinstellingen onder penvoerderschap van Acacia Water.

Dit rapport behandelt het onderzoek dat is gedaan naar de huidige en toekomstige stand van zaken van verzilting in de regio Noord-Nederland. Dit rapport is technischer van aard dan de overige drie rapporten en behandelt met name de fysische aspecten van verzilting en hydrologie.

De resultaten van dit onderzoek worden tezamen met die van het perceptieonderzoek en het sociaaleconomisch onderzoek gebundeld in de synthese.

De volgende paragraaf behandelt de opzet van het volledige onderzoek, zodat aan de lezer duidelijk is binnen welk kader het onderliggende deelrapport past.

1.2 Kader hoofdonderzoek

Interne verzilting als gevolg van autonome ontwikkelingen zoals klimaatverandering en bodemdaling stelt de gebruikers en beheerders van het water en de ruimte voor uitdagingen en kansen.

In Noord-Nederland is vanuit de provincies Friesland en Groningen en de inliggende waterschappen Wetterskip Fryslân, Waterschap Hunze en Aa's en Waterschap Noorderzijlvest behoefte aan meer kennis over de feitelijke verzilting op perceelsniveau. Verzilting wordt meestal als bedreiging gezien, maar het kan ook een kans zijn voor een ander gebruik van de ruimte. Verzilting als kans of als bedreiging hangt sterk samen met de percepties van de gebruikers en beheerders in het gebied.

Dit project heeft als doel inzicht te verwerven in de problematiek en kansen van verzilting in Noord-Nederland, gerelateerd aan het perspectief voor de landbouw.

Meer expliciet wordt in dit project antwoord gegeven op de volgende kennisvragen:

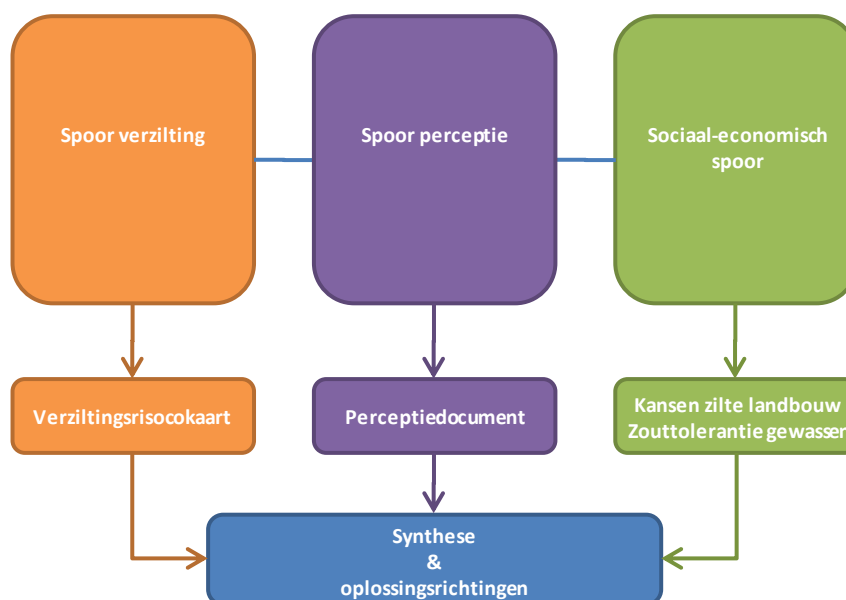
- Hoe verloopt het proces van verzilting van een landbouwperceel; wat zijn de bepalende processen en parameters?
- Hoe is het gesteld met de huidige verzilting van landbouwpercelen in Noord-Nederland?
- Hoe verloopt de verzilting van landbouwpercelen in de toekomst onder invloed van klimaatsverandering?
- Welke percepties zijn er in Noord-Nederland op de toenemende verzilting? Wordt het als kans of risico gezien?
- Wat zijn de gevolgen voor de huidige landbouw. Is adaptatie nodig of rendabel?
- Welke mogelijkheden zijn er voor adaptieve maatregelen, zoals zilte landbouw?

Deze kennisvragen worden in dit project onderzocht in drie parallelle sporen en dit leidt tot de volgende belangrijkste resultaten:

- Een verziltingsrisicokaart van de huidige en toekomstige situatie, die op perceelsniveau inzicht geeft in de verzilting van Noord-Nederland.
- Een rapport met de percepties van zowel gebruikers (agrariërs) als beheerders van de ruimte in Noord-Nederland.
- Een ruimtelijke schets (rapportage) van de factoren die het sociaal-economische klimaat in Noord-Nederland bepalen voor zilte landbouw.
- Een overzicht van de zouttoleranties van de meest voorkomende landbouwgewassen in Noord-Nederland.

Door de resultaten van deze sporen te combineren worden conclusies getrokken over het verschil tussen perceptie en werkelijkheid. Als hieruit blijkt dat de toenemende verzilting een probleem voor de landbouw is, dan worden mogelijke oplossingsrichtingen geformuleerd om gebruik te maken van de kans van dan wel voor het verkleinen van de bedreiging van toenemende verzilting.

Figuur 1.1 toont een schematisch overzicht van het onderzoek, de belangrijkste resultaten en de onderlinge samenhang tussen de sporen en deelrapportages.



Figuur 1.1: De drie onderzoekssporen, de resultaten en de synthese met conclusies en oplossingsrichtingen

1.3 Doelstelling

Het doel van dit deelonderzoek is antwoord te geven op de volgende vragen:

- Hoe verloopt het proces van verzilting van een landbouwperceel; wat zijn de bepalende processen en parameters?
- Hoe is het gesteld met de huidige verzilting van landbouwpercelen in Noord-Nederland?
- Hoe verloopt de verzilting van landbouwpercelen in de toekomst onder invloed van klimaatsverandering?

Een belangrijk uitgangspunt is dat de inzichten en kaartbeelden zoveel als mogelijk uit veldonderzoekmetingen zijn afgeleid en door veldonderzoekmetingen worden bevestigd. Door het combineren van de resultaten van de veldonderzoekmetingen met modelkennis

en gebiedskennis wordt een kaart gemaakt die gebiedsbreed laat zien waar verzilting optreedt in landbouwpercelen nu en in de toekomst.

Deze "verziltingsrisicokaart" is het belangrijkste resultaat van dit deelonderzoek. De kaart en de onderliggende informatie vormt een cruciaal puzzelstukje in de beoordeling of landbouwgewassen daadwerkelijk schade (zullen) ondervinden als gevolg van verzilting.

1.4 Afbakening

Verzilting is een breed gehanteerd begrip, dat een duidelijke definitie behoeft. Wat is verzilting eigenlijk precies? In dit onderzoek wordt conform het onderzoeksprogramma "Leven met Zout Water" (Velstra en Voorde, 2009) de volgende definitie gehanteerd:

"Er is sprake van verzilting als het water te zout/chloriderijk is voor een optimaal gebruik".

Deze definitie bevat drie elementen die aangeven dat er sprake is van verzilting wanneer:

- een toename van zout/chloride gehalte in het water optreedt
- de gebruiker vindt dat het te zout is
- de waterbeheerder vindt dat het te zout is

Deze elementen weerspiegelen de problematiek van verzilting, die zich afspeelt binnen het spanningsveld van de factoren watersysteem, gebruiker en waterbeheerder.

Externe en interne verzilting

Er wordt onderscheid gemaakt tussen externe verzilting en interne verzilting. Interne verzilting is het proces dat brak water in percelen en sloten terecht komt door een toename van kweldruk, door bodemdaling of door meer periodes van neerslagtekort.

Externe verzilting wordt veroorzaakt doordat de zoetwateraanvoer waarmee sloten worden doorgespoeld afneemt.

Binnen dit project richt het onderzoek zich uitsluitend op interne verzilting van grondwater. De focus ligt uitsluitend op het zouter worden van het grondwater in een landbouwperceel als gevolg van het samenspel van kweldruk, neerslag en verdamping. Verzilting van grondwater door beregening, overstroming of door met zeewater verzadigde wind valt buiten de kaders van dit onderzoek.

Ruimtelijke afbakening

Niet binnen alle percelen in de provincies Groningen en Friesland is sprake van (dreigende) verzilting. Op grote afstand van de zee is geen sprake van zout water dat dicht bij het oppervlak aanwezig is, dan wel binnen een tijdshorizon van vijftig jaar aan het oppervlak komt.

De percelen waar geen verzilting voorkomt of wordt verwacht worden niet onderzocht binnen de kaders van dit onderzoeksproject. De grens van het onderzoeksgebied wordt tijdens het project bepaald op basis van rapportages over de diepte van het voorkomen van zout water en bestaande meetgegevens.

Het onderzoek beperkt zich tot het vaste land van Friesland en Groningen. De Waddeneilanden worden niet onderzocht binnen deze studie.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk twee behandelt een aantal belangrijke achtergronden voor het begrip van het onderzoek. In hoofdstuk drie wordt de opbouw en fasering van dit onderzoek en wordt stilgestaan bij de vele bronnen van data die nodig zijn voor de analyses.

Hoofdstuk vier behandelt het veldwerk. Binnen dit hoofdstuk worden zowel de methodiek, de resultaten als de conclusies besproken.

Hoofdstuk vijf behandelt de modellering van de perceelsmodellen. De veldwerkdata uit hoofdstuk vier wordt gebruikt voor het maken van modellen en het valideren van de modeluitkomsten. Uit de modellering volgt welke parameters belangrijk zijn voor het kunnen voorspellen van de klimaatgerelateerde verzilting in Noord-Nederland.

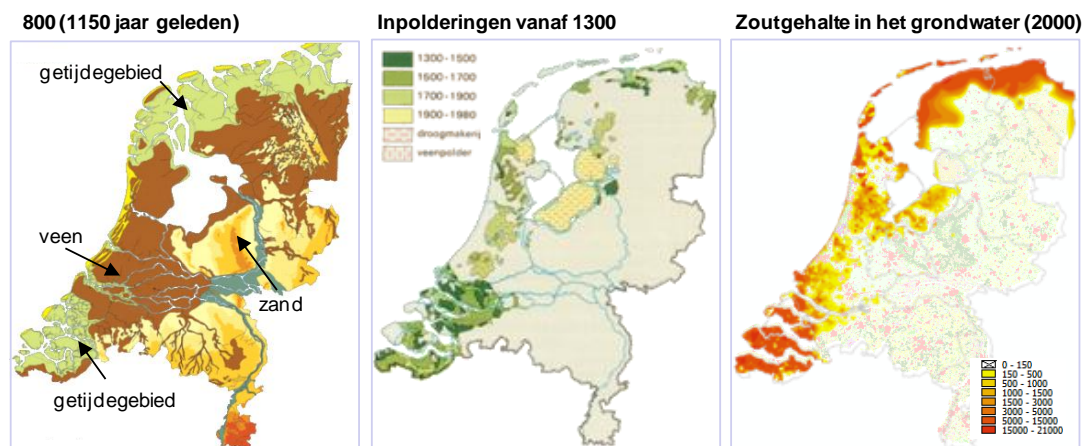
In hoofdstuk zes worden de veldwerkresultaten, modeluitkomsten en de conclusies uit hoofdstuk vier en vijf gecombineerd tot een gebiedsdekkende kaart van het verziltingsrisico in de kuststrook van Noord-Nederland. Aan het einde van het hoofdstuk worden conclusies getrokken over de stand van zaken van verzilting nu en in de toekomst onder invloed van klimaatverandering.

2 ACHTERGROND

2.1 Verziltting in Nederland

Om een beter begrip te krijgen van achtergronden van verziltting in Laag Nederland is een introductie in de wordingsgeschiedenis van Nederland onmisbaar. Waar verziltting optreedt heeft te maken met twee factoren in deze geschiedenis: de kustontwikkeling sinds de laatste ijstijd (het Holoceen) en het proces van inpolderen (ontwatering, landaanwinning en droogmaking) sinds de middeleeuwen.

De belangrijkste fasen zijn weergegeven in Figuur 2.1. Opvallend is overeenkomst tussen de zoet-zout verdeling en de vormingsgeschiedenis van Nederland. Met name de gebieden met een hoge chlorideconcentratie (>10.000 mg/l) komen overeen met de gebieden die in de laatste fase van de kustvorming (800 na Chr.) nog getijdegebied waren: Zeeland, Friesland, Groningen en de kop van Noord-Holland. Het zout bevindt zich hier op een geringe diepte. De overige gebieden met zout grondwater komen overeen met de gebieden die sinds 1300 zijn ingepolderd. Dit zijn gebieden waar het zout als gevolg van de inpoldering omhoog is gekomen. De afzonderlijke fasen zijn hieronder nader uitgewerkt.



Figuur 2.1: Links Nederland 1150 jaar geleden (RACM&TNO), midden inpolderingen sinds 1300 (Atlas van Nederland) en rechts het zoutgehalte tot ca. 20m diepte (TNO).

De kustontwikkeling sinds de laatste ijstijd (het Holoceen)

Het voorkomen van zoutwater in de ondergrond van Nederland is grotendeels een erfenis uit de Holocene geologische geschiedenis vanaf 10.000 jaar geleden, na de laatste ijstijd. De temperatuur begon toen wereldwijd te stijgen. De daarmee gepaarde zeespiegelstijging resulteerde rond 7.500 jaar geleden in het binnendringen van de zee in de huidige kustprovincies. Uit onderzoek blijkt dat dit de belangrijkste bron geweest van het zoute grondwater onder Laag Nederland. Daarnaast vindt er een (geringe) opwaartse beweging plaats van zout uit diepere mariene afzettingen.

Het waddenmilieu dat vervolgens ontstond begon vanaf 5.500 jaar geleden geleidelijk dicht te slibben door sluiting van de kust waardoor veengroei mogelijk werd en het gebied van west Nederland, Drenthe en zuidelijke delen van Friesland en Groningen verzoette. In deze periode waren echter Zeeland, noord Friesland, noord Groningen en de kop van Noord-Holland nog getijdegebied waar zeewater infiltreerde. Een situatie die tot 1200 jaar geleden nog altijd gold. Het zijn deze laatste gebieden waar nu op geringe diepte zout grondwater met hoge chlorideconcentraties wordt aangetroffen.

Proces van inpolderen sinds de middeleeuwen

In de vroege middeleeuwen drong de zee nog herhaaldelijk de regio binnen en in grote gebieden werd het veen weggeslagen. Op deze manier werd in de Middeleeuwen het IJsselmeer gevormd. Langs de kust ontstonden in dezelfde periode de duinen en begon de mens het landschap ingrijpend te veranderen door de ontginning en afgraving van veengebieden, bedijking en inpoldering. Op die manier ontstond het karakteristieke polderlandschap zoals we het vandaag de dag kennen.

Deze lappendeken van polders, met elk zijn eigen kunstmatig gehandhaafd polderpeil en grondwaterstanden, heeft geresulteerd in een complexe situatie van grondwatersystemen. Een situatie van infiltratie in relatief hoger gelegen polders en kwel van zoet en zout water in lager gelegen droogmakerijen. De lager gelegen polders waar kwel optreedt zorgen ervoor dat het eerder vrijwel immobiele zoute water langzaam grootschalig in beweging is gekomen. De bron van dit zoute water is het zeewater dat vooral in de periode voor veengroei, dus in de periode tussen 7.500 en 3.500 geleden, was geïnfiltrerd. Het zoute water komt in deze droogmakerijen van grotere diepte en treft men aan in oude polders zoals de Schermer, Beemster, Haarlemmermeer en Mijdrecht maar ook Flevoland en Wieringermeerpolder.

2.2 Historische ontwikkeling van gebied

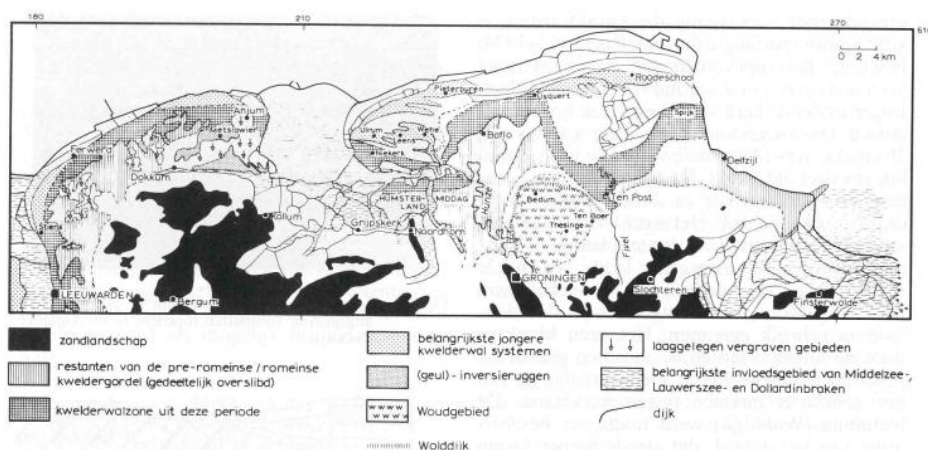
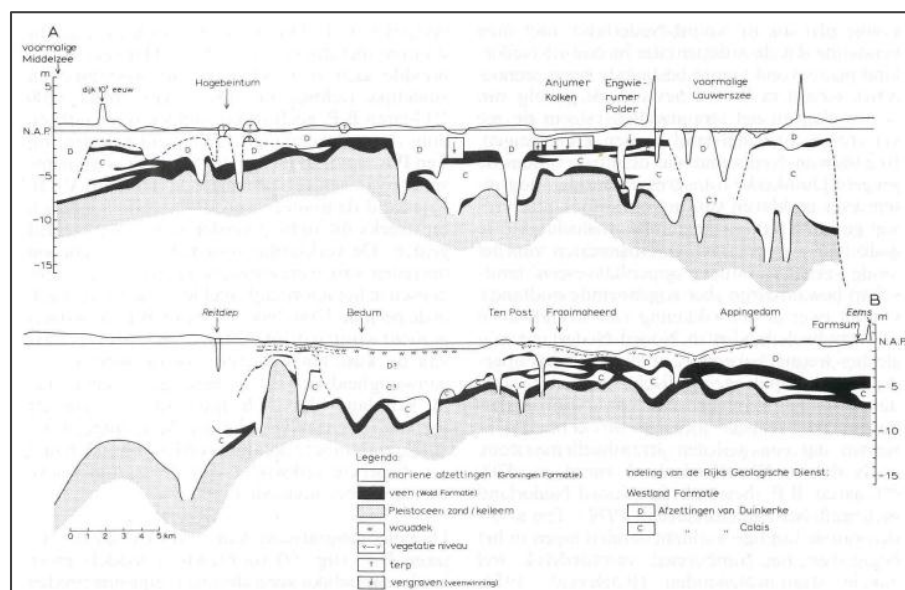
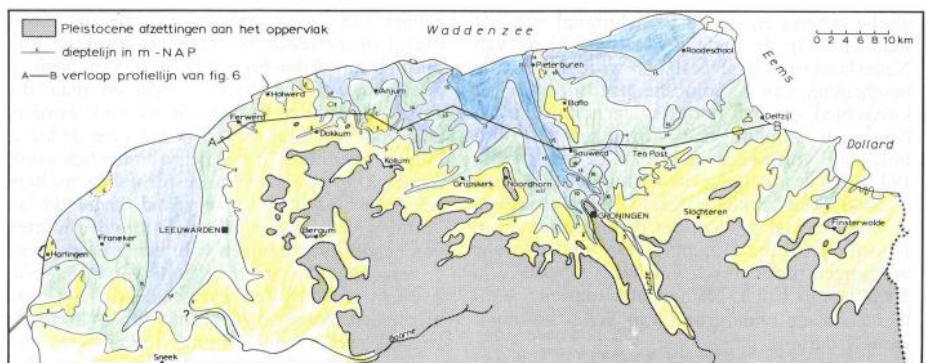
Het aandachtsgebied voor deze studie behelst de gehele noordelijke kuststrook van de provincies Friesland en Groningen. Deze regio wordt gekarakteriseerd door intensieve akkerbouw, waarbij met name vooral poot aardappelen economisch belangrijk zijn voor de regio. Het succes van de akkerbouw is te danken aan de vruchtbare zavel- en kleigronden, die zijn gevormd door betrekkelijk recente afzettingen. Afwisselend vindt men hoger gelegen kwelderruggen en lager gelegen zavel- en lichtkleigebieden langs de kust. Meer landinwaarts worden de bodems zwaarder en zijn zware klei en veen de dominante afzettingen. Op deze gronden vindt vooral veeteelt plaats.

Deze paragraaf beschrijft de historie van het gebied. Het is nodig deze historie te kennen om de aanwezigheid van zout grondwater te verklaren.

De huidige zoet-zout verdeling in Noord Nederland is sterk gerelateerd aan de Pleistocene en met name Holocene ontwikkeling van het gebied. De Holocene ontwikkeling van het gebied is bekend geworden door vooral het werk van Roeleveld (1974) en Griede (1978). In het begin van het Holoceen, de periode 10.000 tot 8.000 geleden, wordt het klimaat milder (warmer en meer neerslag). Hierdoor namen de windafzettingen (dekzanden) af door een toenemende bodembedekking door plantengroei. Bovendien werd plaatselijk veengroei mogelijk. Door de verhoogde afvoerintensiteit trad in het achterland een versterkte erosie op.

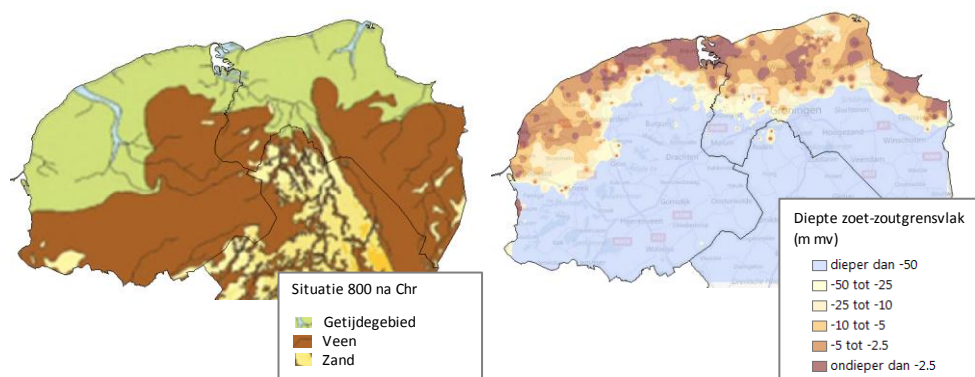
De periode na 8.000 geleden kenmerkt zich door een opeenvolging van transgressies en regressies. Bij een transgressie verplaatst de kustlijn zich landinwaarts, bij een regressie treedt het omgekeerde op. Door de stijgende zeespiegel, met als consequentie hogere grondwaterstanden, werd veengroei mogelijk. De maximale dikte van het Holoceen is tegenwoordig 15m ter plaatse van de huidige kustlijn (zie Figuur 2.2 voor een doorsnede). De oudste holocene afzetting bestaat uit het basisveen dat kustwaarts steeds dieper voorkomt en plaatselijk ontbreekt door latere mariene erosie.

De kwelderruggen worden ca. 3000 geleden gevormd, die later weer deels geërodeerd zijn. Uit deze periode dateert ook de eerste bewoning in het gebied. Tijdens de volgende transgressieperiode ongeveer 2500 jaar geleden werden de veenmoerassen overspoeld en kon zich een sli blaag vormen. De zee brak ver landinwaarts door waarbij diepe geulen



Figuur 2.2: (a) Diepte van het Pleistoceen dat overeenkomt met de basis van het Holoceen. (b) doorsnede over het gebied met daarin aangegeven de verschillende bodemeenheden. (c) De verschillende landschappelijke structuren in het zeeleigebied (Roelvelde en Griede, 1982)

werden gevormd. Door de inbraak in het Lauwersmeergebied kreeg de Hunze een monding naar het westen. In Noordoost Friesland drong de erosie vanuit de Lauwerszee veel minder door. Meer naar het westen werd de Middelzee gevormd. Mede door ontwatering zijn de maaiveldhoogten in de veengebieden sterk gedaald. De geulen zijn daardoor nu als zogenaamde inversieruggen (uitsteken boven het huidige landschap) te herkennen in het landschap. In de 12e eeuw begon de inpoldering van brakke moerasgebieden. In dezelfde periode werden de eerste dijken aangelegd ter bescherming van de zee.



Figuur 2.3: Links de situatie omstreeks 800 na Chr. Rechts de diepte van het zoet-zout grensvlak ten opzichte van maaiveld.

De huidige zout-zoutverdeling reflecteert nog altijd de recente wordingsgeschiedenis van het gebied. Figuur 2.3 toont een kaart van de diepte van het zoet-zout grensvlak (zie ook figuur 3.5) en een kaart met de situatie omstreeks 800 na Chr. De kustlijn uit deze periode komt overeen met de huidige zoet-zoutverdeling in het grondwater. Opvallend is het gebied bij Finsterwolde (Dollardgebied) dat in deze periode (800 na Chr) niet onder invloed van de zee staat, maar waar wel brak tot zout grondwater wordt aangetroffen. Het brakke tot zoute grondwater wordt gerelateerd aan de eerste doorbraak van de oeverwal van de Eems in 1287 en 1288 (Gottschalk, 1971). Intensieve erosie in het Dollardgebied treedt op in de 15e en begin 16e eeuw, waarbij de zee ver landinwaarts doordringt. Vanaf de 16e eeuw is het overstromde land door vele bedijkingen op de zee heroverd.

2.3 Zoetwaterlenzen en grondwatersystemen

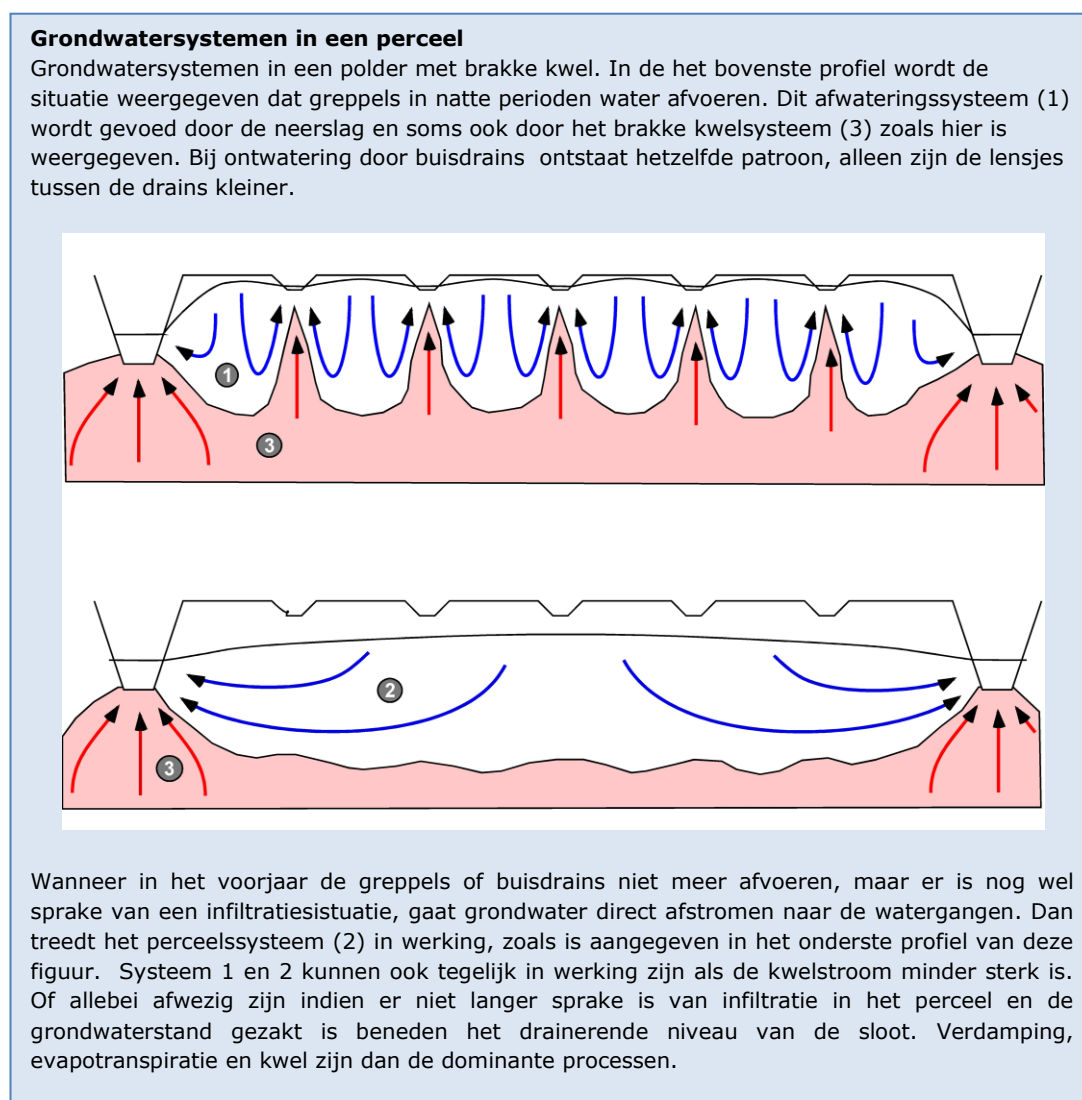
De afgelopen duizend jaar is het ontwateren van moerassen en polders in Nederland bijna tot kunst verheven. Kwamen ontwerpregels en materialen eerst proefondervindelijk tot stand, later werden ze gerationaliseerd door Wageningse ingenieurs, die daarvoor tal van drainageformules ontwikkelden. Hiermee konden grondwaterstanden en afvoeren worden berekend voor allerlei configuraties van drainagemiddelen als sloten, greppels en drains (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1978, De Zeeuw & Hellinga, 1958, Krayenhoff van de Leur, 1958).

Het principe van een zoetwaterlens, dat drijft op zout water, en dat wordt aangevuld door neerslagwater dateert van de eerste beschrijvingen van zoetwaterlenzen onder eilanden en duinsystemen (Drabbe & Badon Ghijben, 1889 and Herzberg, 1901).

Voor drainagesystemen en zoetwaterlenzen (of regenwaterlenzen) geldt dat de opgewekte grondwaterstromen zich gedragen volgens de ordeningsregels van natuurlijke grondwaterstromingsystemen, zoals beschreven door Toth (1963), Freeze and Whitherspoon (1990) en Engelen and Jones (1986). Grondwaterstromingsystemen zijn dynamische lichamen van stroombanen, die uit een bepaald infiltratiegebied komen of uitmonden in een bepaalde kwelzone. Dit is uitgewerkt voor Nederland in de Vries (1995) en (Engelen en Kloosterman, 1996). De Vries (1995) integreerde de Wageningse drainageformules in dit concept. Deze systeembenadering passen we ook toe in dit onderzoek.

In polders maakt het kwelwater deel uit van een diep regionaal systeem, dat aangedreven wordt door grondwatervoeding in verder weg en hoger gelegen gebieden. Of op kleinere schaal van een naastgelegen polder met een hoger waterpeil. Het kwelwater, vaak gemineraliseerd of zelfs brak, stroomt gestaag uit in de watergangen en in de drains.

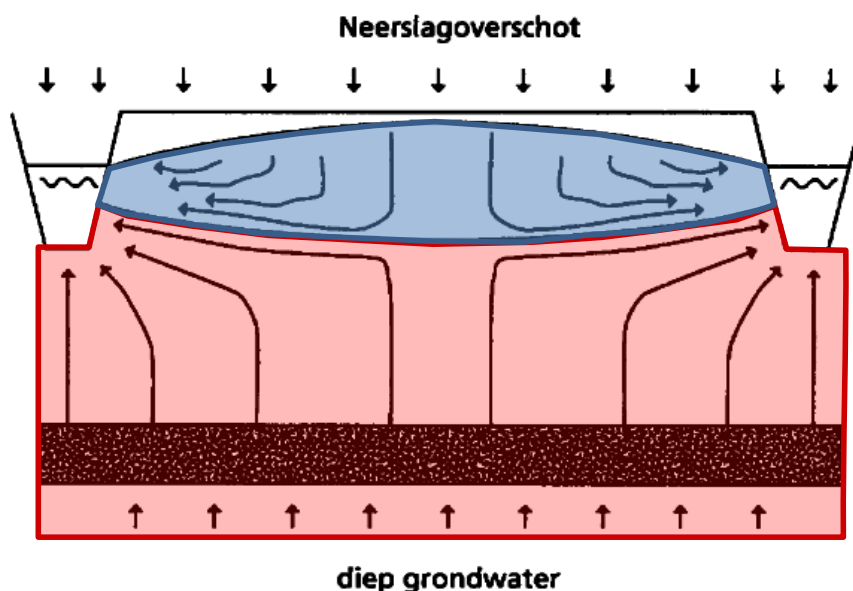
Op het kwelwatersysteem ligt een ondiep systeem, dat wordt gevoed door infiltrerende neerslag op de percelen. Dit zoet water stroomt ook richting de watergangen en drains. Dit perceelssysteem is dynamischer en kan in de zomer uitgeput raken als voeding afwezig en grondwater wordt verdampt door gewassen. Tenslotte kunnen bij hoge grondwaterstanden ook drains en greppels water gaan afvoeren naar de watergangen. Er ontstaan dan tijdelijk kleine grondwaterdrainagesystemen, die weer zijn gesuperponeerd op het perceelssysteem. Het zoete grondwaterlichaam van de beide laatste systemen vatten we samen onder de regenwaterlens. De lens vormt in feite de tijdelijke berging van de geïnfiltreerde neerslag op de percelen.



Verschillende onderzoekers hebben reeds onderzoek gedaan naar het gedrag van de neerslaglens (Poot en Schot 2000 en Schot et al, 2004 en Van der Wal, 2001). A. Poot en P. Schot (2000) beschrijven de dynamiek van de neerslaglens, met verschillende methoden, met betrekking op seizoensvariatie. In de winter is de berekende neerslaglens het dikst omdat er dan sprake is van een neerslagoverschot in tegenstelling tot de zomer. Daarbij reageert in deze simulaties de grondwaterstand sneller op veranderingen in het neerslagoverschot dan dat het grensvlak tussen het neerslagwater en het diepe grondwater reageert.

In het artikel van Poot en Schot met S.C. Dekker (2004) blijkt dat ook bij een zeer hoge opwaartse kweldruk een regenlens kan ontstaan tot een diepte van 1,1m. Daarnaast berekenen ze dat seizoenale neerslagfluctuaties nauwelijks effect hebben op de diepte

van het grensvlak. Terwijl de variatie in droge en natte jaren een grotere invloed heeft op de ligging van het grensvlak. Verder wordt bij percelen met greppels alleen naast de sloten als gevolg van het diepere grondwater een neerslaglens berekend. Het grondwater wat bij de greppels het maaiveld bereikt wordt via oppervlakteafvoer afgevoerd. Volgens de toegepaste methode Immerzeel (IWACO, 1994 en Immerzeel et.al., 1996) treedt dit het eerst en het langst op in het midden van het perceel, wat ervoor zorgt dat er geen dikke neerslaglens kan ontstaan.



Figuur 2.4: Schematische weergave van een neerslaglens in stationaire toestand met constante kwel en neerslagoverschot (aangepast naar Raat, 1999).

Uit de studies is gebleken dat op percelen waar volgens computermodellen (diffuse) kwel zou moeten plaatsvinden, deze kwel in werkelijkheid direct door de sloten wordt afgevangen zonder dat de vegetatie in contact is gekomen met het zoute kwelwater. Geïnfiltreerd regenwater is dan de belangrijkste bron van watervoorziening voor de vegetatie (Poot en Schot, 2000)

Al deze onderzoeken hebben gemeen dat het kwantitatieve aspecten betreft en gebruik is gemaakt van analytische oplossingen en modelsimulaties, ofwel een theoretische beschouwing betreft. De modeluitkomsten zijn ook niet geverifieerd of gecalibreerd op basis van veldmetingen. Daarnaast valt op dat drainagemiddelen geen grote rol speelden in deze beschouwingen.

Het aandeel van afstroming uit de brakke kwel en de perceels- en drainagesystemen verandert in de tijd, zodat ook de zoutgehalten in de watergangen fluctueren. Het seizoenale beeld is dat het relatief lage zoutgehalte van de winterperiode in de loop van voorjaar en zomer geleidelijk toeneemt om dan vrij snel weer te dalen vanaf augustus (Poot en Schot, 2000). Regenperioden kunnen echter leiden tot sterke schommelingen, die gesuperponeerd zijn op dit beeld. Onze hypothese is dat de perceelsdrainage een bepalende rol speelt in de ruimtelijke variatie van zoutgehalten van het ondiepe grondwater maar ook in de variatie in de tijd van zoutgehalten van het oppervlaktewater.

Voor dit onderzoek zijn uitgebreide veldmetingen uitgevoerd om de zoutgehalten in het grondwater en daarmee de regenwaterlens in beeld te brengen. Dat is gedaan op percelen met verschillende drainagemethoden (greppels en drains). Het doel is het concept van de grondwatersystemen te staven en systeemkenmerken te bepalen. Daarbij is ook gebruik gemaakt van de resultaten uit het onderzoek "Leven met Zout Water: deelgebiedstudie HHNK" dat is uitgevoerd in Noord-Holland (Acacia Water, 2011).

2.4 Klimaatverandering en autonome ontwikkelingen

In Noord-Nederland spelen een aantal autonome ontwikkelingen die kunnen leiden tot een verandering in de zoutbelasting. De belangrijkste extern gestuurde ontwikkelingen voor een verandering van het zoutgehalte in het grondwater zijn de (1) de bodemdaling, (2) de zeespiegelstijging en (3) de klimaatverandering.

Daarnaast kan de zoutconcentratie in het grondwater als een toenemend probleem worden ervaren als de landbouw meer gebruik gaat maken van hoogwaardiger, maar vaak ziltgevoeliger gewassen. Er wordt binnen dit rapport alleen aandacht besteed aan de fysische veranderingen die van invloed zijn op het zoutgehalte in het gebied anders dan eventuele veranderingen in landgebruik en beleid.

Bodemdaling

In Noord-Nederland daalt de bodem door zowel natuurlijke als door mensen geïntroduceerde processen. De natuurlijke daling bedraagt ongeveer 25 mm/eeuw en wordt veroorzaakt door isostasie, waarbij Noord-Nederland omhoogkomt met de post-glaciale opvering van Scandinavië sinds het wegsmelten van de gletsjers uit de ijstijd, en door compactie van de bodemlagen onder hun eigen gewicht.

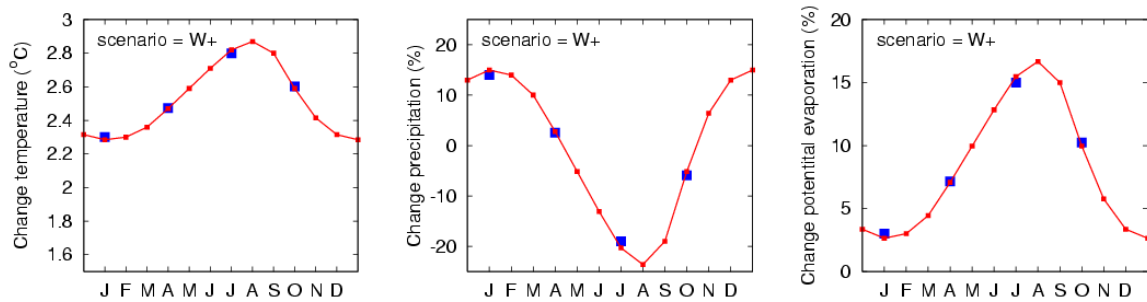
Daarnaast daalt de bodem in Noord-Nederland op plaatsen waar veel veen en/of klei in de ondergrond zit sterk door inklinking na ontwatering of door grote belasting na bebouwing. Een derde belangrijke oorzaak van bodemdaling in Noord-Nederland is de zoutwinning in Friesland en de gaswinning in Groningen.

Zeespiegelstijging

Als gevolg van klimaatverandering is zeespiegelstijging voorspeld. Dit is enerzijds een direct gevolg van de voorspelde opwarming van de aarde omdat het zeewater uitzet bij een verhoging van de temperatuur, waardoor het volume van het in de zee aanwezige water toeneemt. Anderzijds leidt de stijgende temperatuur tot het afsmelten van gletsjers en ijskappen waardoor het water dat momenteel opgeslagen zit landijs zich verplaatst naar de zeeën. Het KNMI heeft een aantal scenario's voor Nederland ontwikkeld, waarop later ook de scenario's die de deltacommissie zijn gebaseerd. In deze studie zijn de meest recente scenario's gebruikt: de KNMI '06 scenario's, met de aanvullingen uit 2009. De voorspellingen voor 2050 zijn bij de KNMI en de Deltacommissie hetzelfde: 20-35 cm zeespiegelstijging bij een opwarming van 2°C.

Verandering in neerslag en verdamping

Klimaatverandering in de komende halve eeuw leidt volgens de voorspellingen tot veranderingen in neerslag en verdampingspatronen. Het KNMI heeft specifiek voor Nederland klimaatscenario's ontwikkeld die zowel de mondiale temperatuurstijging als de mate waarin de luchtstromingspatronen boven Nederland veranderen worden meegenomen. In deze studie worden de voorspellingen volgens het W+ scenario gebruikt. Dit is het scenario met een sterke wereldwijde temperatuuroename van 2 °C en een verandering in de luchtstroming. Het laatste zorgt voor extra warme en natte winters, terwijl de zomers extra warm en droog zijn. Net als voor de zeespiegelstijging is in deze studie gebruik gemaakt van de meest recente scenario's: de KNMI '06 scenario's met de 2009 update. De verandering in de neerslag is bepaald met de klimaatgenerator van het KNMI (http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly). Hiermee zijn de neerslagreeksen van 1994 tot 2005 getransformeerd naar neerslagreeksen onder het W+ omstandigheden. De verdampingsreeksen zijn voor dezelfde jaren omgezet naar de verwachte verdamping in 2050 op basis van de percentuele veranderingen voorspeld onder het W+ scenario (tabel).



Figuur 2.5: Verandering in de temperatuur, neerslag en verdamping, volgens het KNMI '06 W+ scenario (uit Lenderink, 2006).

3 VERZILTINGSPOOR OPBOUW EN INVENTARISATIE

3.1 Inleiding

Het belangrijkste doel van dit deelonderzoek is om een met zoveel mogelijk feiten onderbouwde gebiedsdekkende kaart te maken, die op perceelsniveau inzicht geeft waar op dit moment risico voor verzilting is en waar in de toekomst verzilting verwacht wordt.

In het onderzoek is het voorkomen en de dynamiek van de zoetwaterlenzen op de schaal van een perceel geïnventariseerd, gemodelleerd en getoetst aan veldonderzoekmetingen. In totaal 18 percelen zijn gedurende een jaar bemeten waarbij metingen in april en in september zijn gedaan alsook continue metingen van geleidbaarheid en hydrologische karakteristieken op twee gedurende dit onderzoek geselecteerde percelen.

De resultaten van deze metingen zijn geïnterpreteerd en conclusies zijn getrokken over de processen die bepalend zijn voor het veranderen van zoetwaterlenzen op een perceel. De meetdata dient vervolgens als basis voor een reeks aan kleinschalige hydrologische modellen van de onderzoekspercelen.

De meetgegevens en de modelresultaten verklaren het systeemgedrag van zoetwaterlenzen op lokale schaal. Aan de hand van de in het onderzoek vastgestelde specifieke kenmerken van de verschillende percelen kan dit systeemgedrag worden vertaald naar een regionaal risicobeeld.

3.2 Opbouw verziltingsonderzoek

Het onderzoek is opgedeeld in een viertal fasen (Figuur 3.1):

Fase 1: Inventarisatie & keuze percelen

Het doel van deze fase is om een zo compleet mogelijk beeld te krijgen van de benodigde en beschikbare gegevens en onderzoeken, die noodzakelijk zijn voor het maken van de verziltingsrisicokaart. Er wordt een set van achttien representatieve percelen geselecteerd met een verscheidenheid die recht doet aan de verscheidenheid van landbouwpercelen in de noordelijke kuststrook.

Fase 2: Veldonderzoek

Gedurende een jaar worden de achttien percelen bemeten in verschillende veldonderzoekrondes. De belangrijkste meetrondes hebben plaatsgevonden in maart/april en september 2010. De resultaten van het veldonderzoek zijn geanalyseerd en dienen samen met de resultaten van fase 1 als basis voor de modelsimulaties.

Fase 3: Modelsimulaties

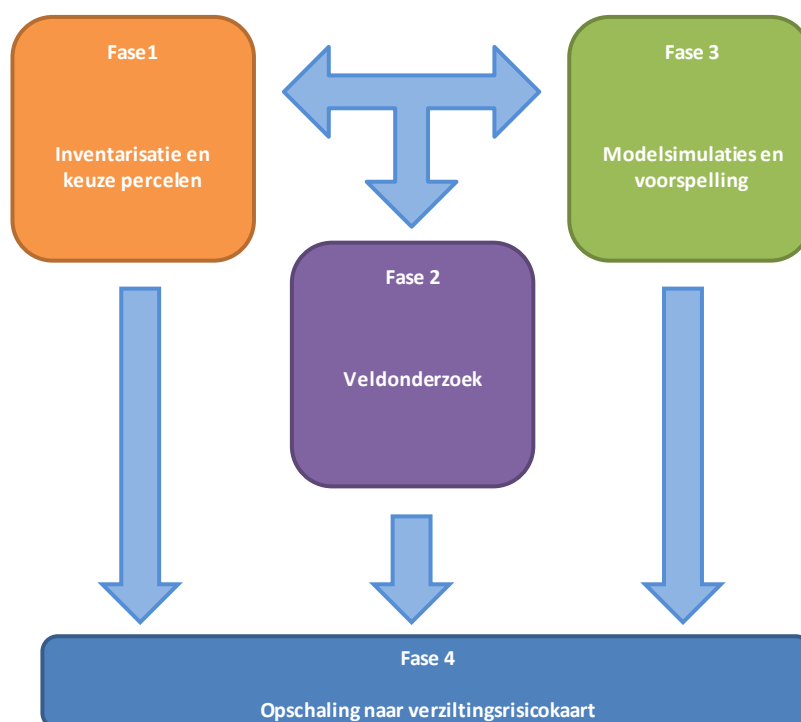
In deze fase worden de waargenomen processen gesimuleerd met als doel voorspellingen te kunnen doen voor de toekomstsituatie, maar ook voor elk denkbaar perceel met een verschillende combinatie van invoerparameters.

De resultaten uit fase 1 en 2 dienen als input voor de modellen, maar ook ter calibratie/verificatie van de modelresultaten. Voor 48 combinaties van invoerparameters zijn perceelsmodellen gemaakt. De resultaten van deze berekeningen vormen een databank, die is gebruikt bij de opschaling naar de gebiedsdekkende verziltingsrisicokaart.

Fase 4: Opschaling

In fase 4 worden de resultaten van de drie voorgaande fase gecombineerd tot een verziltingsrisicokaart voor de huidige situatie en een voor de toekomstige situatie. Ook is in deze fase het toetsingskader besproken waarmee gekwantificeerd is wanneer er sprake is van verziltingsrisico en wanneer niet.

Zoals de figuur laat zien volgen de fasen elkaar niet per definitie lineair op. Zo bleek het door voortschrijdend inzicht noodzakelijk om op een aantal momenten tijdens het proces aanvullende inventarisaties of veldonderzoek te doen. De totstandkoming van de verziltingskaarten is verlopen als een iteratief proces.



Figuur 3.1: Fasering verziltingsonderzoek

Dit hoofdstuk behandelt in de volgende paragrafen de keuze van de veldonderzoekpercelen en de inventarisatie van de benodigde gegevens voor de rest van het project. In hoofdstukken 4 tot en met 6 komen de andere fasen aan bod.

3.3 Keuze veldonderzoekpercelen

3.3.1 Criteria voor selectie percelen

Het is nodig om percelen te kiezen waarvan de conclusies geëxtrapoleerd kunnen worden naar regionale schaal. De aldus gevonden percelen worden karakteristieke of representatieve percelen genoemd binnen de kaders van dit onderzoek.

De eerste vraag die men dan stelt is welke parameters bepalend zijn voor de totstandkoming en verdere ontwikkeling van verzilting in Noord-Nederland. Door deze parameters te inventariseren en vervolgens te analyseren komen we tot een classificatie van de karakteristieke percelen in Noord-Nederland.

Uit literatuur en brainstorms binnen de projectgroep volgde dat de voor dit project op voor relevante gegevens waren:

- Kennis over de regionale bodemopbouw tot enkele meters diep;
- Kennis over het maaiveld en de drooglegging;
- Kennis van de aanwezigheid en diepte van het brak/zoute grondwater in de huidige situatie;
- Kennis van de aanwezigheid, dimensies en type van drainagemiddelen;
- Kennis van het landgebruik;
- Kennis over de diepe stijghoogte of de kwelflux vanuit het diepere grondwater.

3.3.2 Resultaat inventarisatie

Voor elk van de genoemde punten is een data-inventarisatie gedaan. Deze worden hiervolgend beschreven.

Bodemopbouw

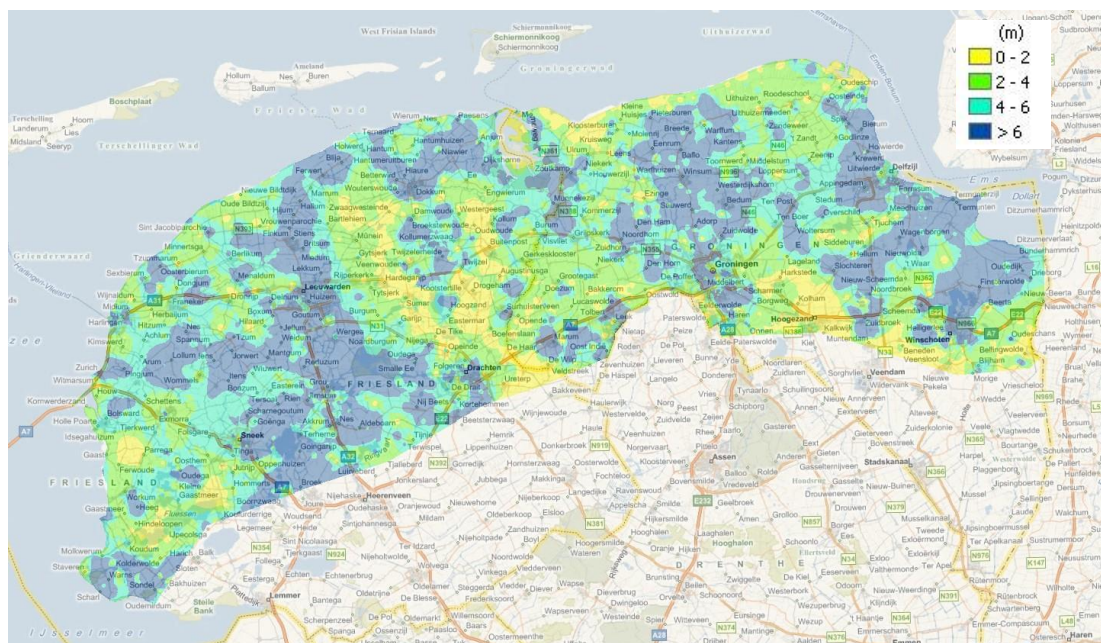
Voor het ondiepe deel van de bodem (tot 1.20 onder maaiveld) is gebruik gemaakt van de 1:50.000 bodemkaart (Stiboka). Daarnaast is in sommige gebieden (bijvoorbeeld de zeeklei gebieden in noordoost Groningen) gebruik gemaakt van 1:10.000 bodemkaarten en de gegevens van ondiepe boringen.

Voor het diepere deel van de bodem (> 1.20 onder maaiveld) was bij aanvang van het project onvoldoende kennis beschikbaar. De bestaande geologische kaarten bieden niet het detail dat nodig is. Wel zijn er duizenden boringen beschikbaar in de landelijke DINO-database. Om deze reden is besloten om de informatie van deze boringen uitvoerig te analyseren en te combineren tot een aantal gedetailleerde kaarten.

Hiervoor is gebruik gemaakt van 30.730 boringen dieper dan 5 meter.

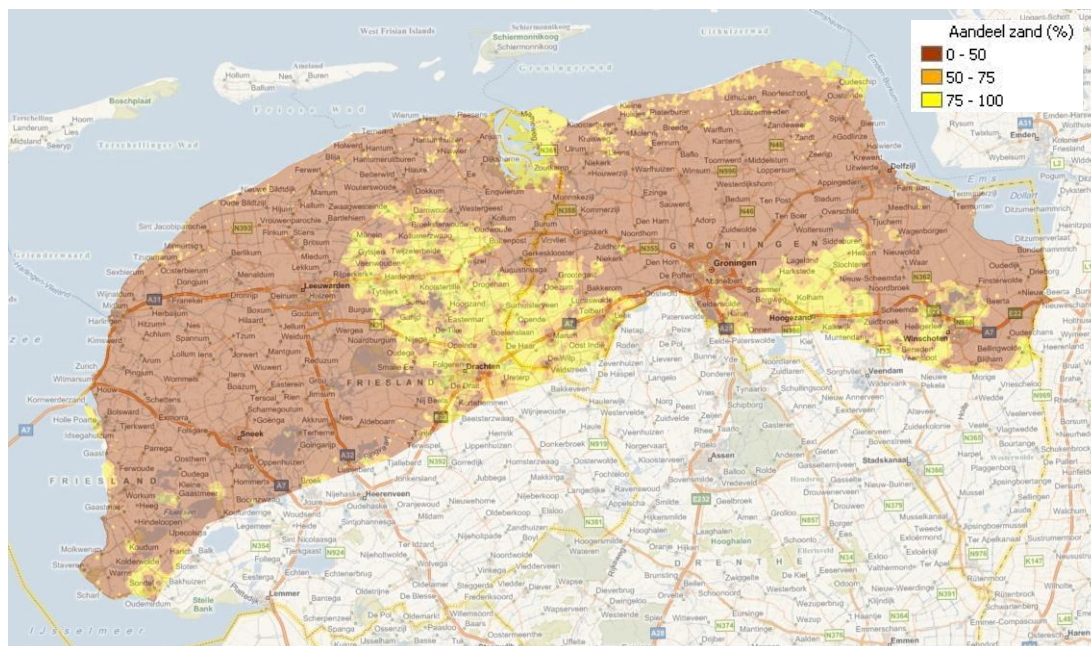
Ten eerste is een kaart gemaakt van de dikte van de deklaag. De deklaag is in dit geval gedefinieerd als de overliggende kleilaag op de zandlagen. Als er sprake is van een zandlaag van meer dan twee meter is er sprake van een overgang van deklaag naar watervoerend pakket.

Door gebruik te maken van een geautomatiseerd algoritme is uit de boorbeschrijvingen het niveau te herleiden waarop de dagzomende kleilagen overgaan in (wad)zandlagen. Vervolgens is deze via een kriging-algoritme geïnterpoleerd tot een gebiedsdekkende kaart (Figuur 3.2)



Figuur 3.2: Dikte deklaag (m) in aandachtsgebied

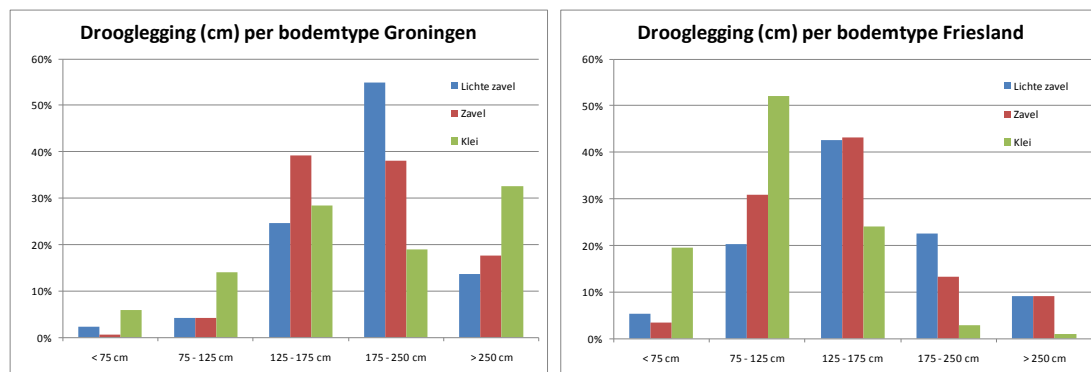
Ten tweede is de diepe ondergrond in de verticaal geschematiseerd met stappen van 1 meter. Per "plak" van 1 meter is bepaald of in dit diepte-interval klei, zand of veen kan worden verwacht. Zo ontstaat een driedimensionaal beeld van de ondergrond waarin nauwkeurig kan worden gezien welk materiaal zich waar bevindt in de bovenste paar meter van de ondergrond in Noord-Nederland (zie bijvoorbeeld Figuur 3.3 voor de bovenste meter).



Figuur 3.3: Voorkomen van zand in diepte interval 0 tot 1 meter onder maaiveld

Maaiveld en drooglegging

Voor het maaiveld is gebruik gemaakt van een bewerkte kaart van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN). Uit deze kaart zijn verstoringen zoals bebouwing weggefilterd. Door deze kaart te combineren met de polderpeilenkaart is een droogleggingskaart gemaakt. Figuur 3.4 toont de verdeling van de drooglegging per bodemtype per provincie.



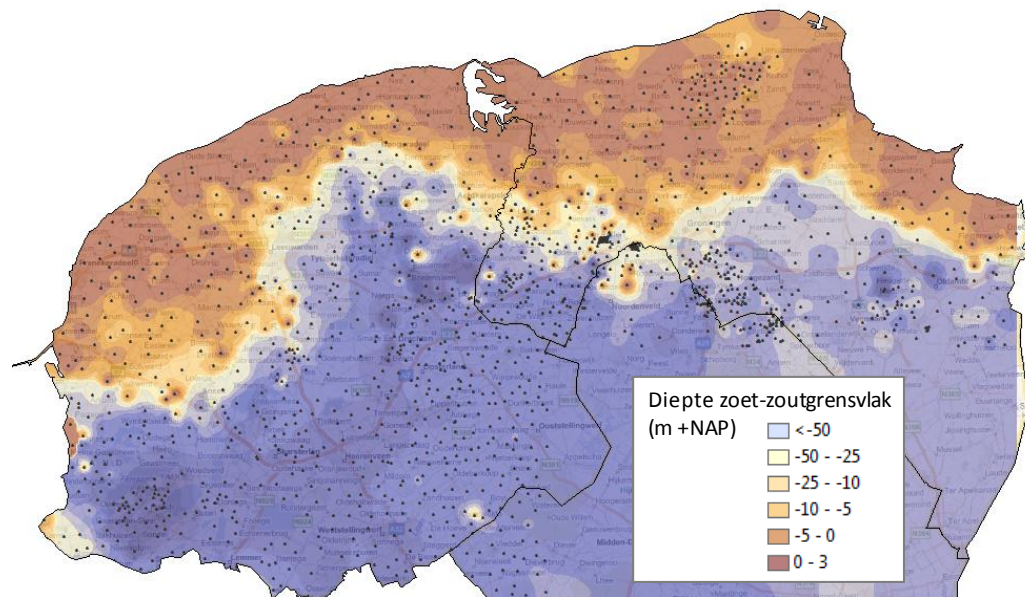
Figuur 3.4: Verdeling van drooglegging per provincie

Zowel in de provincie Groningen als in de provincie Friesland komen droogleggingen voor van meer dan twee meter. De kleigronden met grote drooglegging in de provincie Groningen corresponderen met de zware kleigronden in het Oldambt. De hoger gelegen lichte zavelgronden waarop veel akkerbouw plaatsvindt hebben ook vrijwel zonder uitzondering een grote drooglegging. Opvallend is dat gemiddeld genomen de percelen in Groningen een grotere drooglegging hebben dan in Friesland.

Aanwezigheid van brak grondwater

In Friesland en Groningen zijn in de jaren vijftig en zeventig van de vorige eeuw vele geofysische metingen uitgevoerd naar de geleidbaarheid van de ondergrond. Deze meetinspanning was ten behoeve van de zoetwaterverkenning in het noordelijk deel van Nederland door het ICW.

In totaal zijn 1744 zogenaamde VES-metingen (verticale elektrische sonderingen) geschikt bevonden om te gebruiken voor het bepalen van de diepte van het zoet-brak grensvlak (Figuur 3.5).



Figuur 3.5: Diepte zoet-zout grensvlak op basis van VES-metingen.

Daarnaast zijn er nog enkele chloridereeksen beschikbaar in de landelijke DINO-database. Deze zijn gebruikt ter verificatie van de kaart die is gemaakt uit de VES-metingen.

Aanwezigheid en type van drainagemiddelen

De percelen worden gedraineerd door perceelssloten en detailontwatering als sloten en greppels. De perceelssloten liggen in de (lichte) zavelgebieden en jonge zeekleigebieden in Friesland en Groningen veelal meer dan 100 meter uit elkaar. Deze gebieden worden vooral gebruikt voor akkerbouw. In de knipkleigebieden achter de kwelderruggen komen kleinere slootafstanden van 50 meter voor.

Van grote invloed op de hydrologie op perceelsniveau is de aanwezigheid van drainagemiddelen zoals greppels en drainagebuizen. Of deze er liggen, hoe diep deze liggen en om de hoeveel meter deze liggen is allesbepalend voor de vorming en dynamiek van zoetwaterlenzen en het voorkomen of uitblijven van verzilting.

De beschikbare informatie over de drainagemiddelen op perceelsniveau bestaat vooral uit de kaarten die zijn gemaakt voor de landelijke STONE studie(2005), waarvoor in 2010 voor het NHI een controle is gedaan. Uit onder meer bodemkarakteristieken is door de onderzoekers van het STONE-project een gebiedsdekkende kaart afgeleid met informatie over het type perceelsdrainage (drainagebuizen of greppels), het drainageniveau en de onderlinge afstand tussen de drainagemiddelen.

De aanwezigheid en de dimensies van aanwezige drainagebuizen is nader geïnventariseerd. Enerzijds is dit gedaan door gebruik te maken van gebiedskennis van de waterschaps- en provincied medewerkers binnen de projectgroep anderzijds door navraag te doen bij bedrijven die landbouwdrainage aanleggen.

Meer omvattend is de enquête die aan 700 landbouwers in het aandachtsgebied is verstuurd. Met hulp van het adressenbestand van LTO-Noord is een evenwichtig verspreide groep landbouwers een enquête gestuurd met daarin een aantal vragen over de karakteristieken van hun drainagesysteem. Dankzij een respons van ~20% zijn in totaal meer dan 100 datapunten geschikt bevonden.

Aan de agrariërs is gevraagd welk type drainage zij op hun percelen hebben (greppels of drains), de bijbehorende diepte en onderlinge afstand. 88% van de respondenten geven aan dat ze gebruik maken van drainagebuizen eventueel in combinatie met greppels. De resterende 12% heeft ofwel geen ontwateringsmiddelen of alleen greppels.



Figuur 3.6: Drainafstand gerapporteerd door deelnemers enquête



Figuur 3.7: Draindiepte gerapporteerd door deelnemers enquête

Figuur 3.6 en Figuur 3.7 tonen de voor dit onderzoek belangrijke parameters afstand tussen de ontwateringsmiddelen (meestal drains) en de diepteligging.

De respondenten zijn evenredig verspreid over het gebied, wat de representativiteit van de resultaten voor het gehele gebied versterkt. Verreweg de meest gebruikte drainafstand is tussen de 8 en 12 meter. In Groningen komt vaker een drainafstand van meer dan 12 meter voor.

De draindieptes bevinden zich in het algemeen tussen 75 en 125 cm. In Groningen liggen de drains veelal wat dieper dan in Friesland. Dit correspondeert met de waarneming dat de drooglegging in Groningen gemiddeld genomen ook groter is.

Landgebruik

Welk landgebruik wordt toegepast is niet alleen relevant om te bepalen of verzilting een bedreiging of kans vormt, maar het aanwezige gewas heeft ook invloed op de vorming van zoetwaterlens. Op de hoger gelegen zavelgronden vindt veel wisselteelt plaats. Voor de provincie Groningen is de pootaardappelteelt het belangrijkste landbouwgewas. In Friesland komt in plukjes ook vollegrondsgroenteteelt voor. Bloembollen worden slechts sporadisch geteeld.

Voor de analyse is gebruik gemaakt van de LGN 5 kaart.

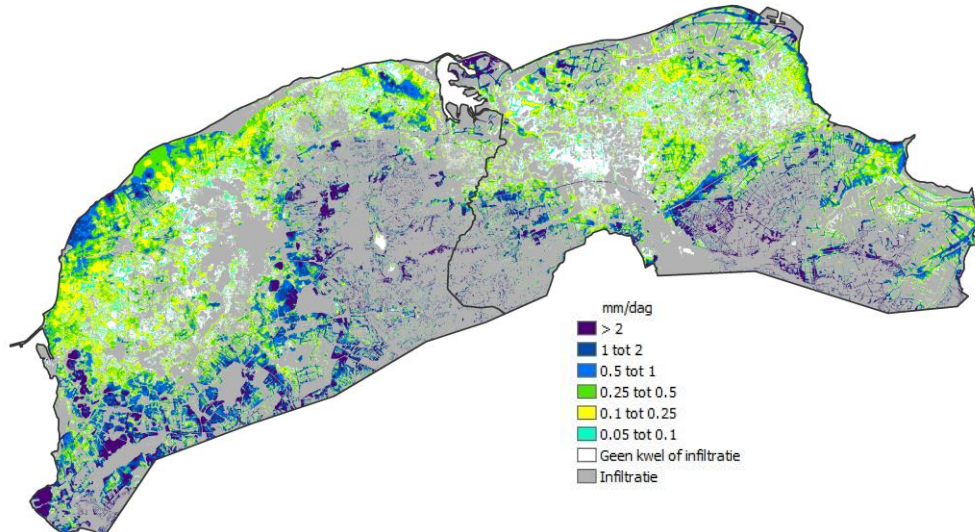
Kwel en infiltratie

In sommige percelen is meer kweldruk dan andere. De stroming vanuit het diepere grondwater kan bepalend zijn voor de vorm of aanwezigheid van de zoetwaterlens ter plaatse (o.a. Schot, 2004), zodat kennis van de diepe grondwaterstand of kweldruk noodzakelijk is.

De schaal van stroming in het watervoerend pakket is regionaal, dus wordt gebruik gemaakt van de resultaten van het regionale MIPWA-model (Snepvangers en Berendrecht, 2007) om te bepalen waar kwel verwacht kan worden. MIPWA is niet ontworpen om op zeer klein detail de kwelstroom kwantitatief goed te berekenen. Dit betekent dat in het vervolg met een onzekerheid rekening gehouden moet worden.

Voor het selecteren van de "karakteristieke percelen" is het vooral relevant of kwel ter plekke optreedt. Het al dan niet optreden van kwel wordt nog extra gevalideerd door de stijghoogtereeksen van de peilbuizen in het regionale watervoerende pakket te beschouwen. Wanneer de stijghoogten het grootste deel van het jaar hoger zijn dan het gehanteerde polderpeil aan het oppervlak is het veilig om een kwelsituatie aan te nemen.

Figuur 3.8 toont de kwelkaart (stationaire situatie) volgens het MIPWA-model.



Figuur 3.8: Kwelkaart (stationaire situatie) volgens het MIPWA model

Opvallend is dat de met MIPWA berekende hoeveelheid kwel op de meeste gebieden in de noordelijke kuststreek minder is dan 0,5 mm/d. Dit is in vergelijking met de polders in het westen van het land of de Flevopolders een relatief lage kwelflux.

In enkele gebieden is door het MIPWA model een sterkere kwelflux berekend. Vooral in het oog springen het gebied ten noordwesten van Franeker, de laaggelegen polders ten westen van Anjum en ten noordwesten van Dokkum, de lager gelegen gebieden in de omgeving van Kloosterburen en de aan de Eems gelegen gronden van het noorden van het Oldambt. Daarnaast is er hogere kwel berekend nabij de Eemshaven.

3.3.3 Analyse gegevens

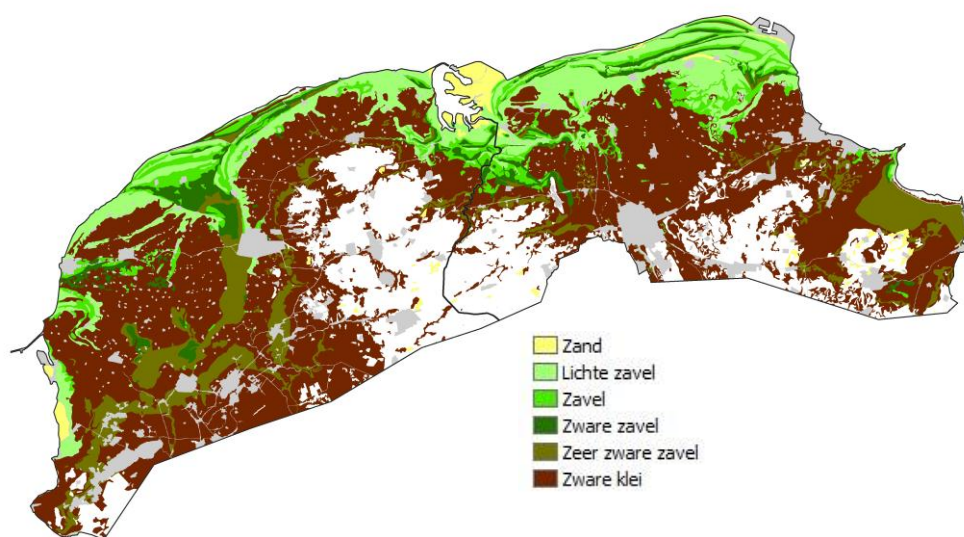
Allereerst is het onderzoeksgebied afgebakend. Voor de ontwikkeling van potentieel verziltende gebieden is het nodig dat zout grondwater zich dicht bij maaiveld bevindt. Voorafgaand aan het meet- en modelleeronderzoek was dit een arbitraire keuze. Er is op voorhand voor gekozen om het onderzoeksgebied te nemen vanaf de kust tot die plek in het binnenland waar de 5 ohmm weerstandscontourlijn dieper ligt dan 5 meter onder maaiveld. Deze weerstandscontour is bepaald door interpolatie van de VES-metingen.

Voor het selecteren van de karakteristieke percelen is het van groot belang om onderscheid te maken tussen diepe kwel en lokale kwel (bijvoorbeeld dijkse kwel). Of het om diepe of lokale kwel gaat is uit de kwelkaart van MIPWA niet op te maken. Bij de selectie van percelen moet daarom gebiedskennis worden ingezet, zodat een perceel niet te dicht bij een overgang tussen twee bemalingsgebieden of nabij een boezemtocht wordt gekozen.

De bodem in het aandachtsgebied bestaat op de hogere kwelderruggen uit lichte zavelen en zavelgronden. In de lage gedeelten achter de kwelderruggen is sprake van (knip) klei. In de recente indijkingen komt eveneens zware klei voor. De bodems in Noord-Friesland en Noord-Groningen zijn afgezet in een wadachtigmilieu. Voor het gehele aandachtsgebied geldt dat naarmate men dieper de grond in kijkt de bodems grover en zandiger worden. Verschillende bodemparameters zijn van belang voor de grootte en dynamiek van de zoetwaterlenzen. Hydrologisch beschouwd zijn de doorlatendheid en de bergingcapaciteit van de bodem het belangrijkste. Deze parameters correleren met de porositeit en het lutumgehalte in de bodem (referentie). Het lutumgehalte is de hoeveelheid aan deeltjes kleiner dan 2 µm en correleert met de doorlatendheid van de bodem. Voor het karakteriseren van het gebied is het gebied opgedeeld in vijf bodemtypen (Tabel 3.1). Met deze karakterisering kan de bodemkaart vereenvoudigd worden tot kaart weergegeven in Figuur 3.9.

Tabel 3.1: Onderverdeling in bodemtypen naar lutumgehalte

Bodemtype	Lutumgehalte	Bodemtype	Lutumgehalte
Zand	< 10%	Zware zavel	30 - 40%
Lichte zavel	< 20%	Klei/ zeer zware	40 - 50%
Zavel	20 - 30%	Zware (knip) klei	> 50 %



Figuur 3.9: Vereenvoudigde bodemkaart

3.3.4 Theoretische Perceelstypen

Een selectie is gemaakt van theoretische percelen die voldoende diversiteit hebben om representatief te zijn voor het grootste deel van de noordelijke kuststreek. Hiervoor zijn in samenwerking met de projectgroep en gebiedskenners een aantal randvoorwaarden en criteria opgesteld.

De karakteristieke percelen moeten minimaal voldoen aan de volgende randvoorwaarden:

- Het zout moet op minder dan 5 meter diep zijn op basis van de geïnventariseerde kaart van de diepte van het 5 Ohmm grensvlak.
- Er moet sprake zijn van een kwelsituatie;
- Een perceel mag niet nabij groot oppervlaktewater liggen of nabij een overgang van peilgebieden. Dit is om lokale kwel uit te sluiten.
- Er moeten zo min mogelijk heterogeniteiten in de ondergrond aanwezig zijn, zoals bijvoorbeeld veenlagen.

Verder moeten de percelen onderling verschillend zijn in:

- Drooglegging en maaiveld;
- Bodemtype;
- Drainagetype (minimaal één begreppeld perceel);
- Drainagekarakteristieken (variatie in diepte en afstand);
- Gewas, de selectie moet een spreiding tussen minder en meer verdampende gewassen bevatten alsook voldoende percelen met de dominante gewassen in de noordelijke kuststreek ((poot)aardappelen, granen, bieten);
- Een gelijkmatige regionale spreiding;
- Hoge en lage intensiteit van kwel (op basis van de beschikbare kwelkaart);

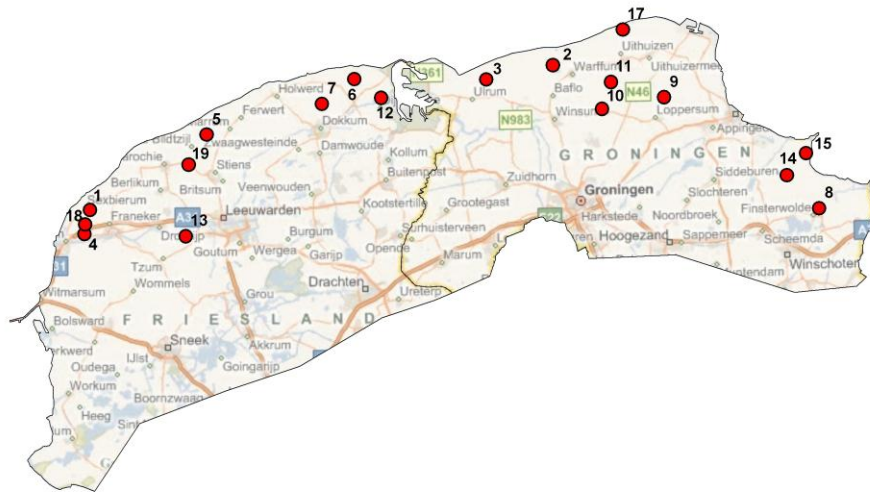
3.4 Veldonderzoekpercelen

Met de criteria van paragraaf 3.3.4 zijn vervolgens agrariërs benaderd met de vraag of op een van hun percelen een al dan niet continue meetopstelling kon worden ingericht.

Dit heeft geleid tot de uiteindelijke selectie van 18 percelen weergegeven in Tabel 3.2 en Figuur 3.10.

De percelen voldoen alle aan de voorafgestelde eisen met uitzondering van een perceel nabij Uithuizen in het noordoosten van Groningen. Ondanks dat het een vermoedelijk infiltratiegebied betreft is gekozen om het perceel toch te gebruiken vanwege het feit dat er nauwelijks informatie beschikbaar over de diepte van het zout in deze hoek van Noord-Groningen. Tijdens de zoetwaterverkenningen van de jaren 50 en 70 is deze hoek niet bemeten.

Er zijn één begreppeld perceel en zeventien gedraineerde percelen geselecteerd. De reden hiervoor is dat eerder drains dan greppels representatief zijn voor de landbouwgronden in Noord-Nederland. Het begreppelde perceel is geselecteerd om te onderzoeken hoe de invloed op het zoetzout grensvlak verschilt tussen greppels en drains.



Figuur 3.10: Locaties percelen veldonderzoek Noord-Nederland

3.5 Percelen continumetingen

Het veldonderzoek heeft plaatsgevonden in twee rondes, in het voorjaar en het einde van de zomer. Dit geeft echter maar beperkte informatie over hoe de zoetwaterlens zich gedurende het jaar ontwikkelt.

Om deze reden zijn twee percelen geselecteerd vanaf het voorjaar tot in het najaar intensiever en vaker zijn bemeten. Ook is op deze percelen gebruik gemaakt van loggers die een continubeeld geven van het verloop van enkele parameters (zie paragraaf 4.2 voor een overzicht).

De keuze is gevallen op perceel 4, Herbaijum en perceel 11 Rottum. Beide percelen toonden tijdens de eerste meetronde een duidelijke, veelbelovende karakteristieke zoetwaterlens, waardoor deze percelen het meest geschikt zijn bevonden voor de aanvullende metingen.

Tabel 3.2: Veldonderzoekpercelen en karakteristieken

Nummer	Plaatsnaam	Bodemsoort	Gewas in 2010	Ontwatering	Drainafstand (m)	Draindiepte (m)	Maaiveld	Drooglegging	Kwel
1	Sexbierum	lichte zavel	pootaardappel	Drain	x	x	0.59	1.7	-0.23
2	Den Andel	lichte zavel	wintertarwe	Drain	x	x	1.21	1.9	0.02
3	Kruisweg	lichte zavel	rogge + groenbemester	Drain	10	x	1.55	2.5	-0.9
4	Herbaijum	zavel	gras	Drain	8	x	0.3	1.5	-0.32
5	Koedijk Nieuwe Bildtzijl	zavel	wintertarwe	Drain	12	-1.1	1.5	1.5	-0.05
6	Langrousterwei Oosternijkerk	lichte zavel	suikerbieten	Drain	9	x	0.83	1.2	0
7	Hantummerburen	knipklei	gras	Drain	10	-0.6	0.29	1.2	-0.04
8	Finsterwolde	klei	gras	Drain	8	x	0.79	2.5	0.27
9	Zeerijp	zavel	suikerbieten	Drain	9	x	0.66	1.9	-0.14
10	Fraamklap Middelstum	knipklei	gras	Drain	6	x	-0.3	1.3	-0.2
11	Trekweg Rottum	zavel	wintertarwe	Drain	8	-1.25	0.42	1.6	0
12	Anjum	zware knipklei	gras	Greppels	x	-0.35	-0.6	0.9	-0.4
13	Blessum	knipklei	gras	Drain	9	x	0.25	1.5	-0.05
14	Nieuwolda	zware knipklei	wintertarwe	Drain	11	-1.05	-0.61	1.3	-0.01
15	JohannesKerckh Woldendorp	zavel	luzerne	Drain	10	-1.08	-0.37	1.5	-0.7
17	Uithuizen	zavel	wintertarwe	Drain	10	-1.25	1.35	1.9	0.2
18	Voortrijp Sexbierum	lichte zavel	wintertarwe	Drain	8	-1.37	-0.77	1.3	-0.76
19	Vrouwenparochie	zware zavel	consumptie aard./gras	Drain	8	-1.55	0.78	1.6	-0.25

4 VELDONDERZOEK

4.1 Inleiding en doel veldonderzoek

Op percelen in het onderzoeksgebied is gedurende een jaar (2010) veldonderzoek uitgevoerd met verschillende methodieken.

Aanvankelijk was de rol van het veldonderzoek in het verziltingsspoor tweeledig, namelijk voor inventarisatie van de tevoren gedachte benodigde parameters en voor verificatie van de numerieke perceelsmodellen. Gedurende het proces bleek het veldonderzoek echter zulke interessante resultaten te geven dat via systematische analyse van de data verschillende nieuwe inzichten rondom de dynamiek van zoet en zout in percelen zijn gevonden. Door de verschillende metingen te combineren is het gedrag van de zoetwaterlens en het optrekken van zout water goed af te leiden.

Aan deze analyse van de metingen is paragraaf 4.5 en volgend gewijd. Eerst wordt in de volgende paragrafen de veldonderzoekopzet en -methodiek toegelicht.

4.2 Opzet veldonderzoek

Het veldonderzoek heeft plaatsgevonden in twee grote meetrondes en een aantal kleinere meetrondes voor twee percelen die intensiever zijn bemeten. Dit zijn de zogenaamde continumetingen.

Een perceel is zo gedefinieerd als een stuk land dat ligt tussen twee perceelsslots in. Het gehele perceel is getoetst op homogeniteit van de ondergrond, zodat uit praktische overwegingen ervoor is gekozen maar een deel van het perceel te gebruiken voor de diverse metingen. Door de homogeniteit van het perceel is het kleinere deel waarop het veldonderzoek is uitgevoerd maatgevend voor het gehele perceel.

De volgende metingen zijn uitgevoerd voor alle percelen:

- CVES-metingen
- EM34-metingen
- Bodemprofielen op diverse plaatsen
- Hooghoudtproef ter bepaling van de k-waarde
- EC-meting van de perceelssloot
- Watermonsters van het grondwater zijn geanalyseerd op chloridegehalte
- Prikstokmeting

Daarnaast zijn op de continupercelen aanvullend uitgevoerd:

- EC-metingen in de drain met een automatische diver
- Grondwaterstanden in peilbuizen ter hoogte van de drain en tussen de drains met een automatische diver
- Handmatige metingen van de grondwaterstand
- Meting van de neerslag met een regenmeter (tipping bucket)
- EM39 meting ter onderbouwing van de CVES-meting

Tabel 4.1 toont wanneer de metingen op de percelen hebben plaats gevonden.

Tabel 4.1: Bemeten percelen en datums veldonderzoek

perceel	locatie	eigenaar	gewas	Metingen op perceel				
				maart/april	juni	juli	september	november
1	Sexbierum	F. Jukema	pootaardappel	v			v	
2	Den Andel	R. Clevering	wintertarwe	v			v	
3	Kruisweg	H. Westers	rogge + groenbemester	v			v	
4	Herbajjum	A. Hofstra	gras	v	v	v	v	v
5	Koedijk Nieuwe Bildtzijl	H. Polstra	wintertarwe	v			v	
6	Langrousterwei Oosternijkerk	J. Hoekstra	suikerbieten	v				
7	Hantummerburen	S. Postumus	gras	v			v	
8	Finsterwolde	P. Prins	gras	v			v	
9	Zeerijp	M. Huizinga	suikerbieten	v			v	
10	Fraamklap Middelstum	K. de Bont	gras	v			v	
11	Trekweg Rottum	J. Boerma	wintertarwe	v	v	v	v	v
12	Anjum	H. Vlasma	gras	v			v	
13	Blessum	D. Attema	gras	v			v	
14	Nieuwolda	A.E.F. Ten Kate	wintertarwe	v			v	
15	JohannesKerch Woldendorp	L.K. Fledderman	luzerne	v			v	
17	Uithuizen	H.U. en J.H. Coolman	wintertarwe	v			v	
18	Voorrijp Sexbierum	P.S. Hollenga	wintertarwe	v			v	
19	Vrouwenparochie	W. Limburg	consumptie aard./gras	v			v	

4.3 Veldonderzoekmethoden

Het veldonderzoek beoogt met name de veranderingen in zoutconcentraties in het grondwater gedurende een jaar te meten. Hiervoor is gebruik gemaakt van een groot aantal methoden. De verschillende toegepaste meetmethoden zijn beschreven in bijlage 2. De belangrijkste gebruikte methoden zijn de geofysische methoden en in het bijzonder de CVES methode. Deze methode wordt om die reden hieronder nader toegelicht.

Geofysica en CVES methode

Bij geofysische methoden wordt de elektrische geleidbaarheid of de weerstand van de ondergrond gemeten. De geleidbaarheid is de reciproke van de weerstand.

Zoet water en zout water hebben een groot verschil in elektrische geleidbaarheid. Dit komt doordat zout water goed geleidende chloride-ionen bevat. Hoe zouter het water, hoe meer ionen, hoe beter de geleidbaarheid en hoe lager dus de weerstand is. Het contrast in geleidbaarheid tussen zoet en zout water maakt de elektrische geofysische methode bij uitstek geschikt om de dynamiek van het zoete en zoute water in beeld te brengen.

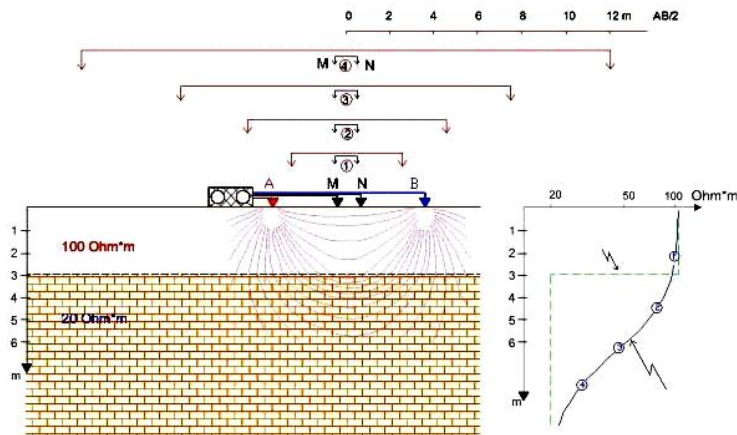
De met geofysica gemeten weerstand is een optelsom van de weerstand of geleidbaarheid van de bodemsoort, het vochtgehalte en het zoutgehalte van de bodem.

Om de gemeten weerstand goed te kunnen interpreteren en duiden is het daarom nodig om ook opnames van de bodem te doen, de grondwaterstand te bemeten en de kwaliteit van watermonsters te analyseren.

Met deze veelvoud aan data kan geanalyseerd worden waar het zoute water zich bevindt in de ondergrond en kan de mate van zout zijn, het chloride gehalte, worden gemeten.

De "continuous vertical electrical sounding"-meting ofwel CVES is de belangrijkste meetmethode in dit onderzoek (Dahlin, 1993). De CVES is in feite een uitbreiding op de VES-meting waarbij een tweedimensionaal beeld wordt verkregen van de ondergrond.

Bij een VES meting (Vertical Electrical Sounding) wordt op één punt de schijnbare weerstand van de ondergrond gemeten. Dit wordt gedaan door tussen twee stroomelektroden een stroom door de ondergrond te sturen. Twee potentiaalelektroden ertussenin meten het potentiaalverschil. De afstand tussen de stroomelektroden wordt in



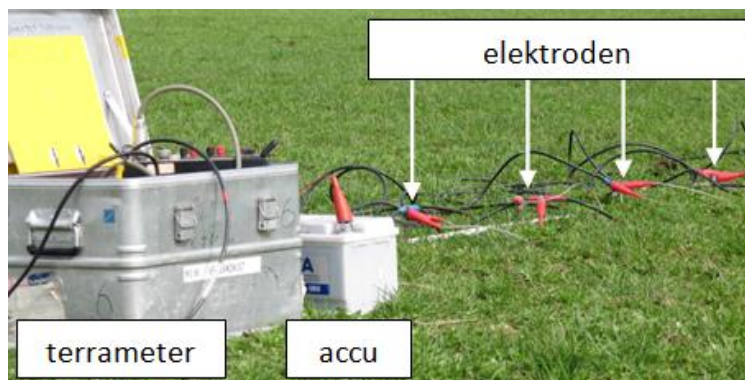
Figuur 4.1: Schematische weergave van de meetopstelling van een VES (links) en de resulterende interpretatie in een lagenmodel (rechts)

stappen vergroot waardoor telkens over een andere diepte de schijnbare weerstand wordt gemeten.

Op basis van het potentiaalverschil (V), de stroomsterkte (I) en een geometrische factor (G) (afhankelijk van de elektrodeafstand) kan de schijnbare weerstand (ρ_a) van de ondergrond worden berekend:

$$(4.1) \quad \rho_a = G * \frac{V}{I}$$

De schijnbare weerstand is het gemiddelde van de weerstand van verschillende bodemlagen vanaf het maaiveld tot op een bepaalde diepte (afhankelijk van de elektrodeafstand). Het resultaat is een lagenmodel van de formatieweerstanden op één punt. Een VES meting geeft daarmee een eendimensionaal beeld van de ondergrond. Voor een tweedimensionaal beeld van de ondergrond worden meerdere elektroden op rij geplaatst. Dit is een zogenaamde CVES meting (Continuous Vertical Electrical Sounding).



Figuur 4.2: Meetopstelling CVES

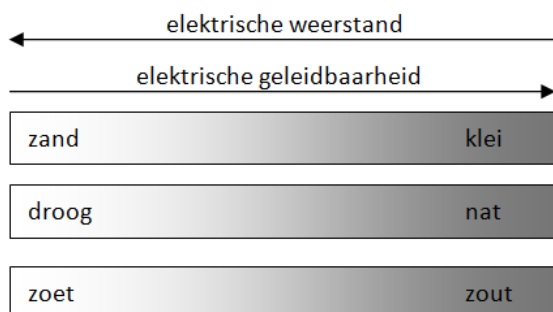
Metingen met de mogelijke elektrodencombinaties zijn uitgevoerd met een ABEM SAS4000 Terrameter. Hierdoor wordt de elektrische weerstand op meerdere diepten en locaties over de raai gemeten. De resolutie en penetratiediepte zijn afhankelijk van de gekozen profiellengte en de daarmee vastgelegde elektrodeafstand. Er kan gekozen worden voor verschillende configuraties. Gekozen is voor hoge resolutiemetingen met de zogenaamde de Schlumberger configuratie (ca. 750 metingen per profiel). De

interpretatie van de metingen is uitgevoerd met het softwarepakket RES2Dinv van GEOTOMO Software. Dit resulteert in een tweedimensionaal weerstandsbeeld van de ondergrond.

Het resultaat van de CVES-meting is een verticaal transect van de weerstand van de ondergrond over het bereik van de penetratiediepte van de meting.

Weerstand en chloridegehalte, formatiefactor

De met de CVES gemeten formatieweerstand geeft de weerstand weer van de ondergrond en het poriënwater. In het algemeen geldt dat een lage weerstand overeenkomt met ofwel klei/veen, zout poriënwater of een combinatie. Een hoge weerstand komt overeen met zand, zoet water of een combinatie. Zand met zout poriënwater geeft dus een lagere weerstand dan zand met zoet water. Voor een juiste interpretatie van de resultaten van weerstandsmetingen is aanvullende informatie nodig. Vaak is dat al aanwezig (bijvoorbeeld DINOloket) maar ook kan het nodig zijn de meting uit te voeren in combinatie met grondboringen (grondwaterstand en bodemopbouw), EC metingen van het grondwater en hoogtemetingen (vanwege evt. hoogteverschillen).



Figuur 4.3: Invloed bodem en grondwatereigenschappen op geleidbaarheid en weerstand.

Door toepassing van de wet van Archie (Archie, 1942) met betrekking tot de relatie tussen formatie- en waterweerstand en toepassing van een empirische relatie tussen waterweerstand en chloridegehalte kan uit de gemeten formatieweerstand een indicatie worden gegeven over het chloridegehalte van het grondwater in de zandpakketten.

De weerstand ρ_f in Ohmm is gerelateerd aan de watergeleidbaarheid σ_f (EC) in $\mu\text{S}/\text{cm}$ volgens:

$$(4.2) \quad \sigma_f = \frac{\rho_f}{10000}$$

Eerst dient de gemeten geleidbaarheid door VES, CVES of te worden geconverteerd naar een standaardtemperatuur van 20 °C met behulp van de gemodificeerde relatie van Jorgensen (1989):

$$(4.3) \quad \sigma_{f20} = \sigma_f \frac{82}{2T + 42}$$

waar σ_{f20} de standaard formatiegeleidbaarheid bij 20 °C, σ_f de gemeten formatiegeleidbaarheid en T de temperatuur is. De temperatuur op elke diepte kan worden afgeleid uit waarnemingen of de geometrische gradiënt en de gemiddelde jaartemperatuur aan het oppervlak. Waar geen metingen beschikbaar zijn is een temperatuur (T) van 10 °C (Volker, 1962) aangenomen.

De formatiegeleidbaarheid σ_{f20} moet worden omgezet naar een watergeleidbaarheid σ_w met behulp van de formatiefactor F op basis van de volgende relatie:

$$(4.4) \quad \sigma_{w20} = \sigma_{f20} * F$$

Er zijn wel enkele standaardwaarden voor de formatieconstante per bodemsoort beschikbaar die een indicatie geven (Tabel 4.2). Voor zover mogelijk dient de formatiefactor altijd bepaald te worden op basis van gemeten geleidbaarheid van het grondwater. De gemeten geleidbaarheid van het poriewater wordt gedeeld door de gemeten specifieke geleidbaarheid op de diepte van het poriewater. Deze specifieke geleidbaarheid kan zijn gemeten met de methoden die in de volgende paragrafen aan de orde komen (te weten: VES-, CVES- of prikstokmeting).

Tabel 4.2: Enkele standaardwaarden voor de formatiefactor

Lithologische beschrijving	Formatiefactor
grind met zand	7
grof zand met grind	6
grof zand	5
matig grof zand	4
zwak slihboudend zand	3
matig slihboudend zand	2.5 *
sterk slihboudend zand	2 *
Klei	1 - 3 *
Veen	~ 1

* Schijnbare formatiefactor, want voor kleilig sediment varieert de formatiefactor met de geleidbaarheid van het poriewater

De watergeleidbaarheid σ_{w20} in $\mu\text{S}/\text{cm}$ kan vervolgens worden gebruikt om het chloridegehalte in mg/l te herleiden op basis van de empirische relatie van Post (2008), die is gebaseerd op een groot aantal analyses van grondwater in Laag Nederland. Het bicarbonaatgehalte HCO_3 in mg/l speelt hierin ook een rol. De gevonden relatie ziet er als volgt uit:

$$(4.5) \quad \sigma_{w20} = 2.91 * 10^2 + 2.71 * \text{Cl} - 2.49 * 10^{-5} * \text{Cl}^2 + 9.34 * 10^{-1} * \text{HCO}_3$$

Die met de kwadraatformule omgezet kan worden omgezet naar een relatie waarmee het chloridegehalte kan worden bepaald:

$$(4.6) \quad Cl = \frac{-2.71 + \sqrt{2.71^2 - (4 * 2.49 * 10^{-5} * (-\sigma_w + 291.81 + 0.93 * HCO_3))}}{2 * 2.49 * 10^{-5}}$$

De hier beschreven empirische relaties hebben uiteraard beperkingen. Zo geldt voor de relatie 2.5 dat deze toepasbaar is bij een watergeleidbaarheid groter dan 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

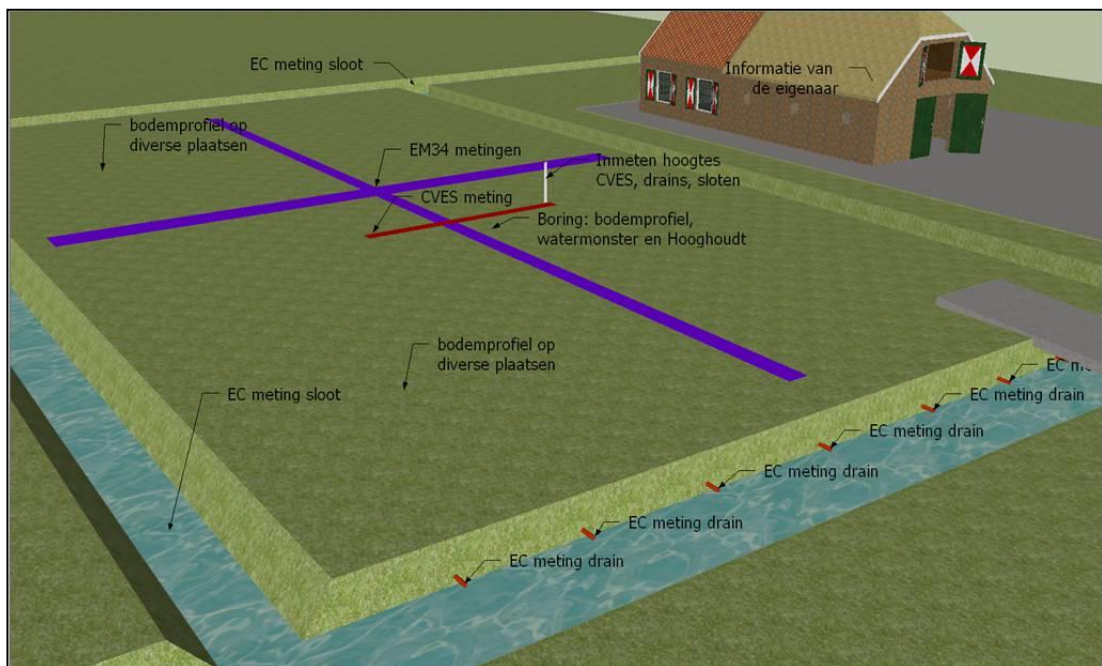
4.4 Werkwijze perceelsmetingen

Bij aankomst op het perceel is contact opgenomen met de eigenaar van het perceel. Dit contact gaf in veel gevallen nuttige informatie over de ligging van de drains, eventuele gedempte sloten en andere bijzonderheden.

Eerst: algemeen bemeten van perceel

Geleidbaarheidsmetingen (EC-metingen) in de omringende watergangen en eventuele greppels of drains zijn gebruikt om een eerste overzicht van de situatie ter plaatse te krijgen. Hierdoor werd duidelijk welke sloten kwel vangen en of de greppels/drains kwelwater afvoeren.

Een EM34-meting (zie bijlage 2) is uitgevoerd om een globale indruk van de weerstand van de ondergrond en de veranderingen in de lengte- en breedterichting van het perceel te krijgen.



Figuur 4.4 Overzicht metingen op een perceel.

Dan: CVES-meting

Op basis van de gegevens uit de verkennende metingen en informatie uit het contact met de eigenaar van het perceel is de locatie van de CVES gekozen. Overwegingen hierbij zijn om stukken met veel variatie (ten gevolge van maaiveldsveranderingen, oude (gedempte) sloten, slootranden) te vermijden.

In enkele gevallen is ervoor gekozen om bepaalde fenomenen juist wel mee te nemen. Zo is tweemaal over een bestaande sloot gemeten (perceel 2 Den Andel en perceel 10 Middelstum), is eenmaal over een oude sloot gemeten (perceel 4 Herbaijum), en is eenmaal over greppels gemeten (perceel 12 Anjum). Als de verwachting bestaat dat het zout diep zit, is gekozen voor een diepere meting dan de gebruikelijke. Dit houdt in dat de elektrodeafstand waarover de CVES wordt uitgezet groter is.

Tijdens de CVES-meting: andere metingen

Voor nadere informatie van de ondergrond is een boring gezet. Ook is een Hooghoudtproef uitgevoerd om de doorlatendheid van de bodem te bepalen. De grondwaterstand is genoteerd en er is een watermonster uit het boorgat genomen. De locaties van de drains, de draindiepte en slootdiepte zijn genoteerd. In een aantal gevallen is een prikstokmeting (bijlage 2) uitgevoerd.

Continumetingen

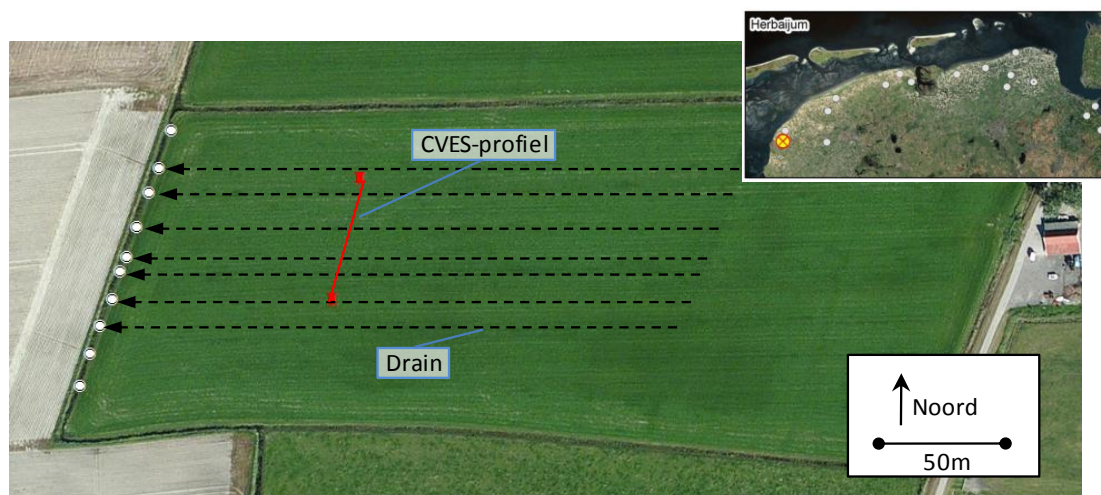
Op twee percelen zijn continuumetingen uitgevoerd (paragraaf 3.5). Hier is vanaf 1 augustus 2010 aanvullend op de CVES-metingen een opstelling geplaatst, zodat de grondwaterstand, de neerslag, de drainafvoer en geleidbaarheid van het drainwater continu gemeten konden worden.

Er zijn peilbuizen geplaatst in de raai van de CVES. De locatie van de peilbuizen is gekozen op basis van de beschikbare informatie en gegevens uit de eerste CVES-meting. Het uitgangspunt is dat het verloop van de grondwaterstand tussen twee drains kan worden gemeten.

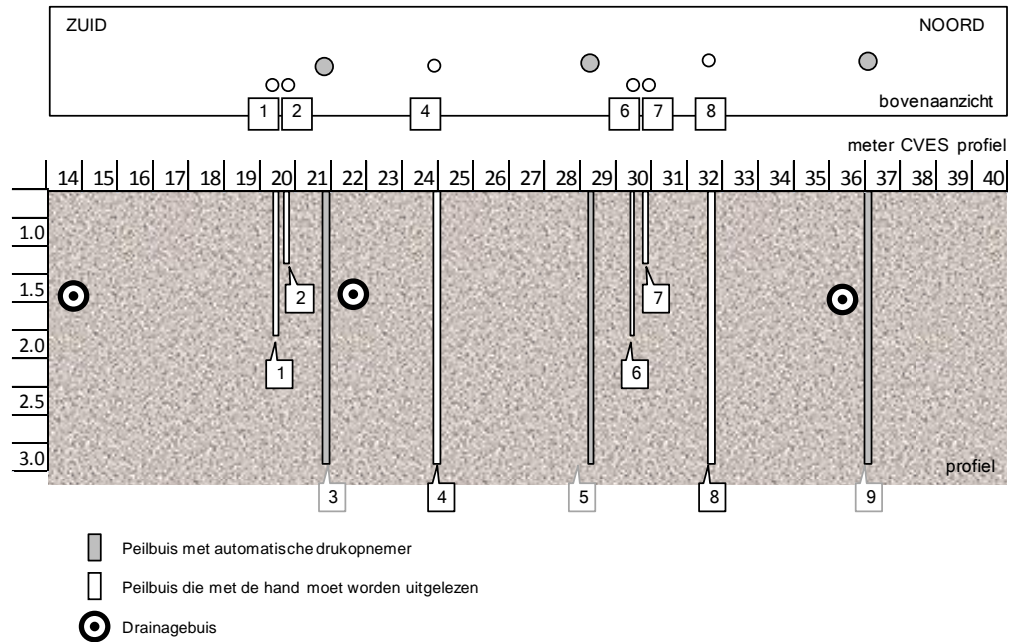
In enkele buizen (3 per perceel) is een diver geplaatst die automatisch met een frequentie van 10 minuten de grondwaterstand meet. De andere peilbuizen worden elke week met de hand gemeten. In de nabijheid van de percelen zijn regenmeters geplaatst zodat de relatie tussen de neerslag en de grondwaterstand kan worden geanalyseerd. In drains zijn CTD-divers die automatisch de temperatuur en de geleidbaarheid van het drainwater meten.

Continuperceel 4, Herbaijum

Figuur 4.5 toont het perceel met daarin aangegeven de ligging van de drains en CVES profiel. Over de lijn van het CVES profiel zijn peilbuizen geplaatst (Figuur 4.6). De afstand aangegeven voor de ligging van de peilbuizen komen overeen met de afstand van de CVES meting.



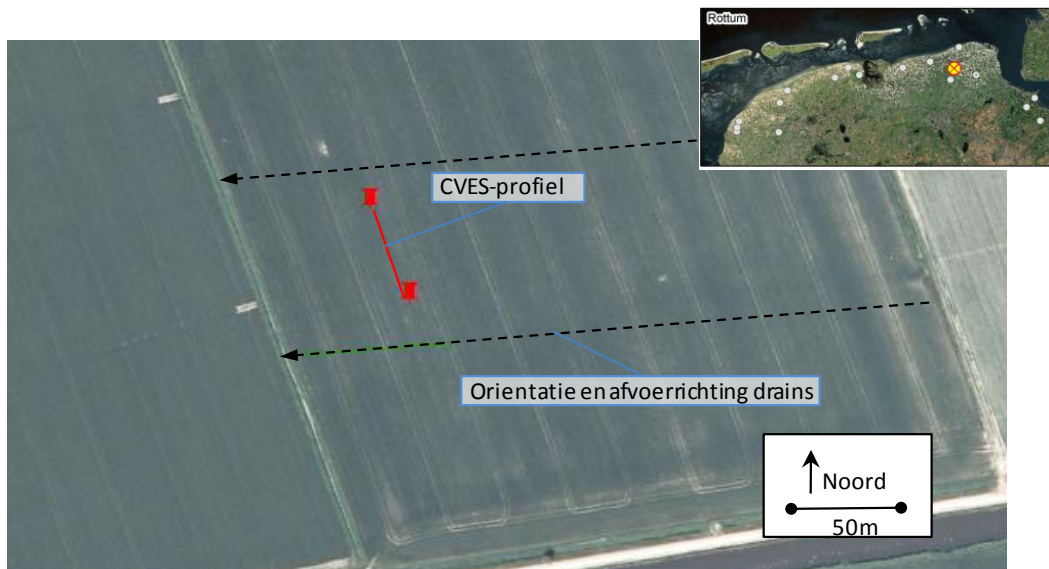
Figuur 4.5: Ligging van de drains en CVES profiel perceel 4, Herbaijum



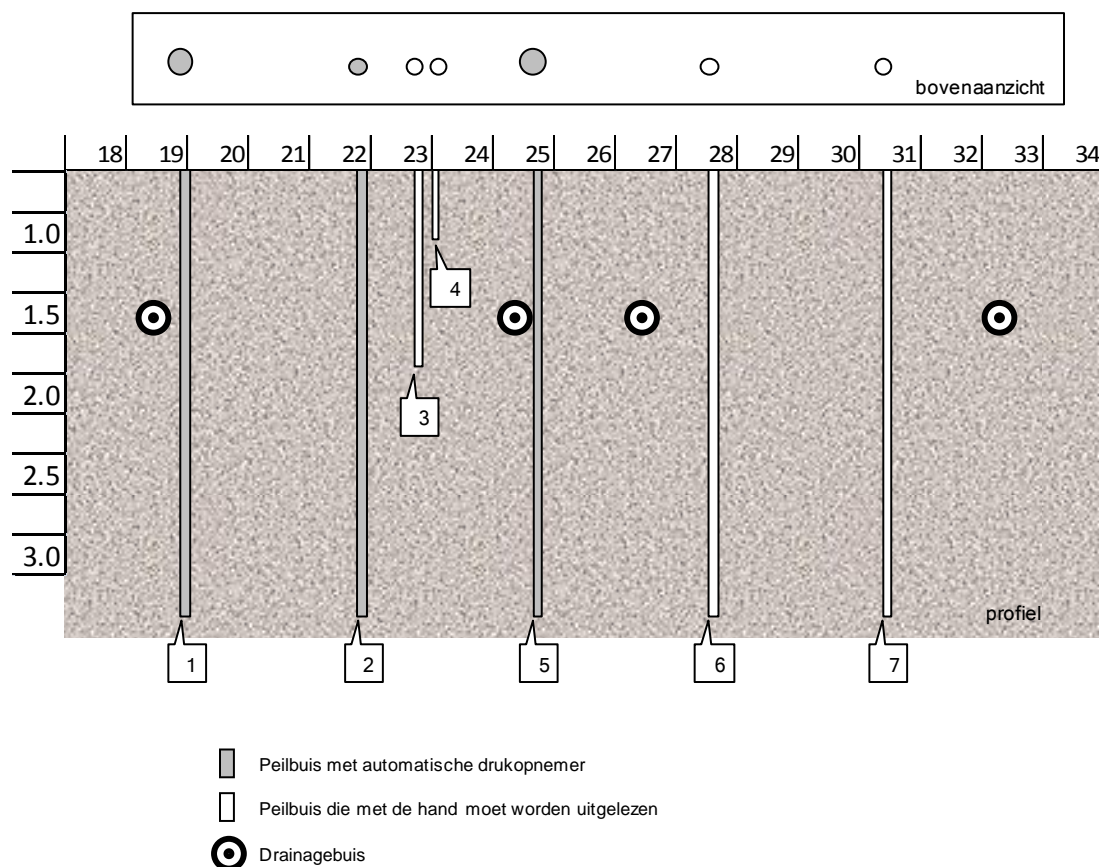
Figuur 4.6: Continu meetopstelling over de raai van de CVES op perceel Herbaijum

Continuperceel 11, Rottum

Figuur 4.5 toont het perceel met daarin aangegeven de oriëntatie en afvoerrichting van de drains en CVES profiel. Over de lijn van het CVES profiel zijn peilbuizen geplaatst (Figuur 4.6). De afstand aangegeven voor de ligging van de peilbuizen komen overeen met de afstand van de CVES meting.



Figuur 4.7: Ligging van de drains en CVES profiel perceel 11, Rottum



Figuur 4.8: Continu meetopstelling over de raai van de CVES op perceel Rottum

4.5 Interpretatie resultaten veldonderzoek

In de twee grote veldonderzoekrondes zijn 15 percelen twee keer bemeten. Perceel 6, Langrousterwei Oosternijkerk, is één keer bemeten. Bij de tweede veldonderzoekronde stond de eigenaar van het perceel niet toe dat er op zijn perceel gemeten werd in verband met de naderende oogst. Daarnaast is op de continupercelen 4 en 11 in totaal vijf keer een CVES-meting gedaan.

De essentie van het veldonderzoek zijn de verticale CVES-doorsnedes. Deze paragraaf beschrijft eerst hoe een dergelijk figuur gelezen dient te worden.

Uit de CVES-figuren zijn verschillende inzichten af te leiden, die worden versterkt door de waarnemingen uit de grondwatermetingen, EC-metingen in de drains, de waterkwaliteitsmetingen en de bodembeschrijvingen. Deze worden in paragraaf 0 besproken.

4.5.1 Interpretatie CVES

Een typische CVES-figuur is getoond in Figuur 4.9. De figuur toont in verschillende kleuren de gemeten weerstand van de ondergrond. Op de verticale as staat in meters de diepte ten opzichte van maaiveld. De horizontale as toont de lengte van de uitgezette CVES.

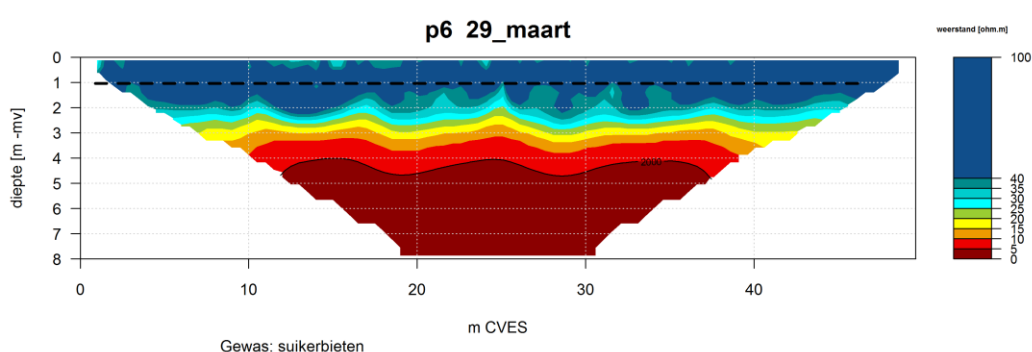
De schaal waarin de weerstand is weergegeven is de Ohmmeter (Ohmm). Een algemene regel is dat bij weerstanden onder de 10 Ohmm het waarschijnlijk is dat er sprake is van brak grondwater (> 1000mg/l).

De weerstand van de ondergrond bestaat uit de weerstand van de bodem plus de weerstand van het water. Het is van belang om te beseffen dat een heterogeniteit in de

bodem, zoals een plaatselijke klei of veenlaag voor een plaatselijk afwijkende weerstand kan zorgen. Zowel veen als klei hebben ten opzichte van zand een lage elektrische weerstand.

De stippellijn – in dit voorbeeld op één meter onder maaiveld – is de grondwaterstand, zoals gemeten op één punt op het profiel tussen de drains tijdens de CVES-meting. Boven de grondwaterstand is in de bodem meestal ook water aanwezig, alleen is de verzadiging niet 100%. Dit is de onverzadigde zone. Tijdens het veldonderzoek is de verzadigingsgraad van de onverzadigde zone niet bemeaten. Om deze reden is het niet mogelijk om kwantitatieve uitspraken te doen over de geleidbaarheid van het water boven de grondwaterstand.

In de figuur staat een contourlijn geplot van het 2000 mg/l grensvlak. Dit is een berekende contourlijn van de concentratie van chloride in het grondwater. Om van gemeten weerstand naar concentratie van het grondwater te gaan moeten een aantal stappen worden gezet. Deze staan in detail beschreven in paragraaf 4.3



Figuur 4.9: CVES resultaat. Weerstand ondergrond perceel 6, Langrousterwei Oosternijkerk

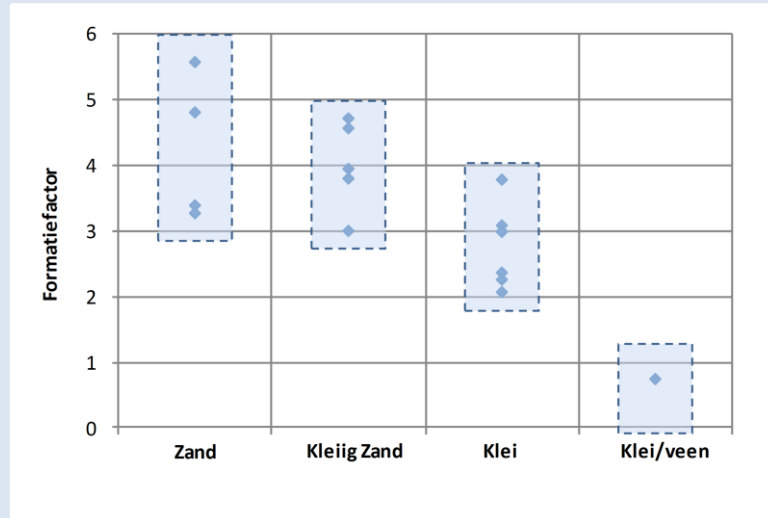
Achtereenvolgens moeten de volgende stappen worden gezet.

- 1) Omzetten gemeten weerstand naar geleidbaarheid van het grondwater volgens relaties (4.1) t/m (4.3). Hiervoor is de formatiefactor nodig. Er zijn theoretische waarden van de formatiefactor bekend (paragraaf 4.3). Deze zijn geverifieerd aan de metingen op de percelen (zie box).

Formatiefactor

De formatiefactor kan worden geschat door de weerstand van de bodem+grondwater (of geleidbaarheid) te delen door die van het bodemwater.

Op ieder perceel is een EC-meting van het grondwater uitgevoerd met een standaard EC-meter. De gemeten EC is vervolgens gecorrigeerd met de eveneens gemeten temperatuur van het grondwater. Dit leidt tot de formatiefactoren weergegeven in figuur:



Uit de figuur volgt dat de gemeten waarden voor de formatiefactor redelijk corresponderen met de literatuurwaarden. Er zit wel een bandbreedte op de getallen. Daarbij rijst de vraag: wat is een zandbodem en wat is een kleibodem?

De bodems in Noord-Nederland zijn zelden helemaal klei of helemaal zand. De kuststrook van Friesland en Groningen bestaat voornamelijk uit zavelrijke wadafzettingen. Vanwege de spreiding aan zandige, matig zandige en weinig zandige bodems ontstaat ook een spreiding in formatiefactoren.

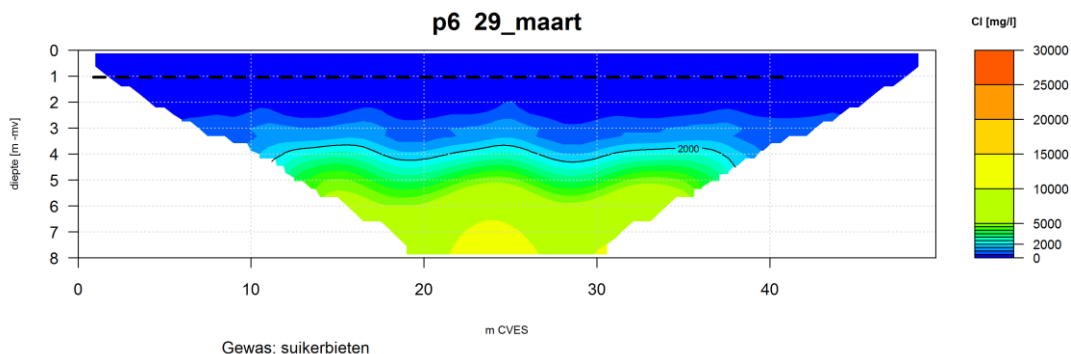
- 2) Uit de weerstand van het bodemwater kan met behulp van relatie (4.6) het chloridegehalte worden berekend.

Bij deze omzetting moeten enkele kanttekeningen worden geplaatst:

- Er is uitgegaan van een homogene bodem, terwijl de bodems in Friesland en Groningen normaliter een verloop hebben van fijn kleiachtig naar grover zand. De bodems zijn echter zelden zeer heterogeen.
- Uit de box formatiefactor blijkt dat er een bandbreedte op de gebruikte formatiefactoren zit. Het formatiefactor getal is dus niet exact bekend.
- De gebruikte relatie is minder geschikt voor lagere chloridegehalten, zoals hier worden aangetroffen.

Deze kanttekeningen betekenen dat er een onzekerheid zit in de berekende chloridegehalten.

Wanneer alle stappen zijn toegepast toont Figuur 4.10 het berekende chlorideprofiel met de diepte.



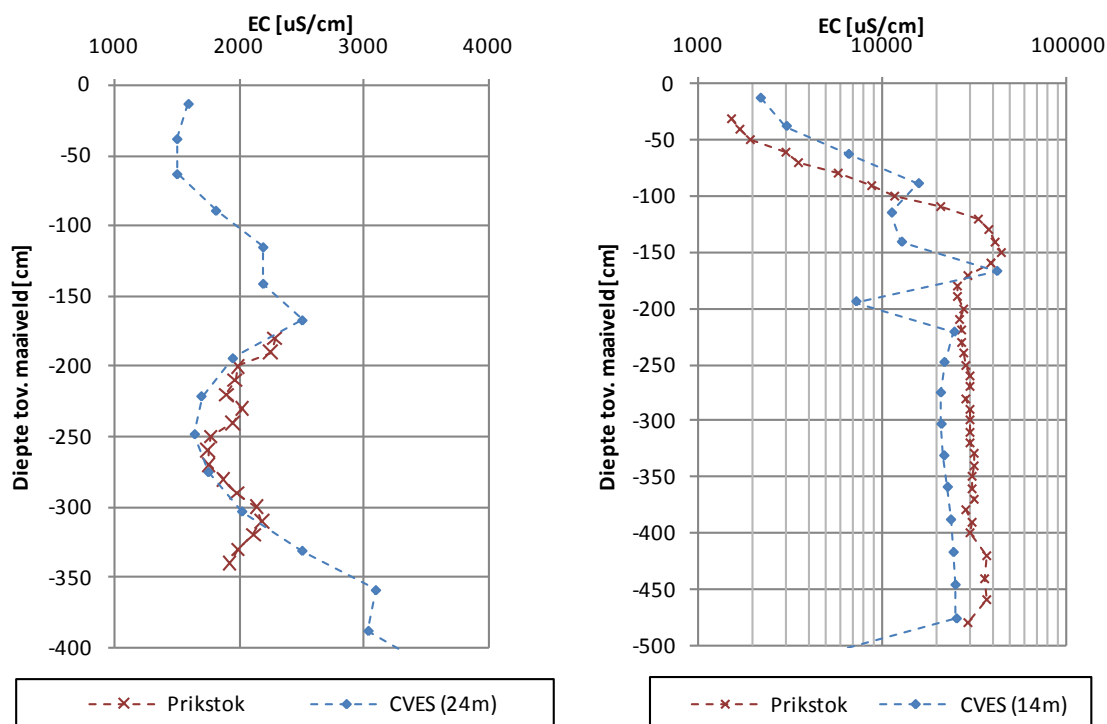
Figuur 4.10: Berekend chloridegehalte van CVES-profiel perceel 6

4.5.2 Verificatie CVES-metingen

Om de betrouwbaarheid van de CVES-metingen te toetsen is een verificatie uitgevoerd met twee andere methoden om de elektrische geleidbaarheid of weerstand te bepalen:

- Er is op twee percelen (perceel 1, Sexbierum en perceel 12, Anjum) een prikstokmeting uitgevoerd.
- Er is op 11 november op perceel 11, Rottum een EM39 meting uitgevoerd in twee peilbuizen.

Zowel de prikstokmetingen als de meting met de EM39 geven een één-dimensionaal profiel van de geleidbaarheid van de ondergrond.



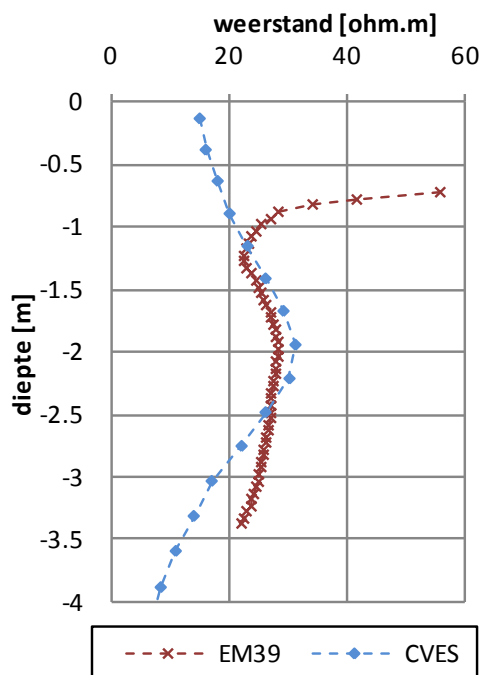
Figuur 4.11: Geleidbaarheidsprofielen van CVES en met prikstokmetingen vergeleken voor perceel 1, Sexbierum (links) en perceel 12, Anjum (rechts)

Figuur 4.11 toont de resultaten van de verificatie met de prikstokmetingen. De figuur toont het verloop van de geleidbaarheid met de diepte voor drie CVES-metingen op verschillende afstanden van het begin van de raai, en het verloop van de geleidbaarheid met de diepte voor twee prikstokmetingen.

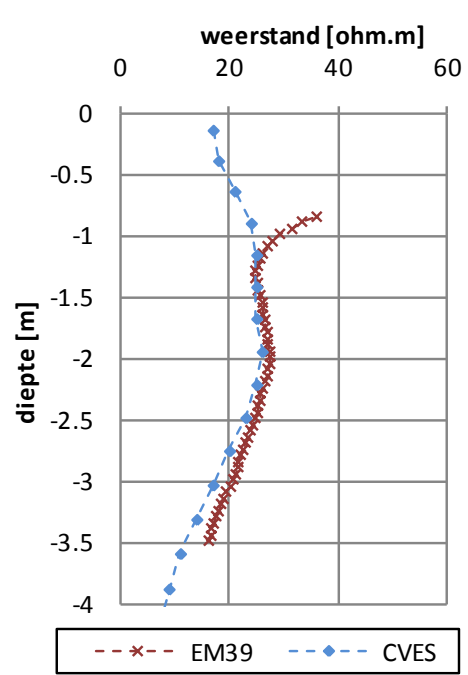
Het verloop van de geleidbaarheid van deze meting is zowel qua vorm als qua waarde vergelijkbaar met het verloop van de geleidbaarheid zoals afgeleid uit de CVES-metingen.

Ook is een vergelijking gemaakt tussen de metingen van de weerstand van de ondergrond van de CVES-methode en de EM39-methode. Figuur 4.12 toont het verloop van de weerstand met de diepte voor beide methoden voor twee metingen op perceel Rottum.

Rottum 19m



Rottum 25m



Figuur 4.12: Weerstandsprofielen in de diepte vanaf maaiveld gemeten met CVES (op 19m en 25 m vanaf het begin van de raai) en met de EM39 op

Uit Figuur 4.12 blijkt dat de CVES en EM39 vanaf +/- 1 meter onder maaiveld en dieper redelijk overeenkomen. De gemeten waarde van de weerstand is in de bovenste meter verschillend. De reden hiervoor is de lengte van de meetsonde van de EM39. In de eerste meter steekt de sonde nog deels boven de grond uit en meet de weerstand van lucht. De werkelijke meting begint daarom op ca. 1m beneden maaiveld.

Alle drie de methoden meten de elektrische weerstand van de bodem, dus moet in principe worden verwacht dat ze dezelfde waarde meten. Er is een kleine afwijking tussen de metingen van de prikstok, EM39 en CVES. Dit betekent dat er een bandbreedte is op de weerstandsmeting van de CVES, waardoor voorzichtigheid moet worden betracht bij kwantitatieve veldonderzoekresultaten. Niettemin is het verschil tussen de verschillende metingen zowel wat betreft waarde als vorm van het weerstandsprofiel klein.

De verificatie toont aan dat de CVES-apparatuur functioneert zoals verwacht en dat de inversiebewerking een weerstandsprofiel bepaald dat correspondeert met puntmetingen als de prikstok en de EM39.

4.6 Resultaten CVES-metingen

In deze en de volgende paragrafen worden de resultaten van het veldonderzoek gepresenteerd en gerubriceerd naar de verschillende inzichten die zijn opgedaan bij de interpretatie van de veldonderzoekresultaten. Voor de analyse van de figuren wordt gebruik gemaakt van de weerstandsfiguren. Deze laten de stromingssystemen duidelijker zien dan de bewerkte chloridegehaltefiguren, waarvan we weten dat de omzetting naar chloridewaarden een onzekerheidsmarge introduceert.

Alle resultaten van de CVES-metingen zijn weergegeven in de bijlage 1.

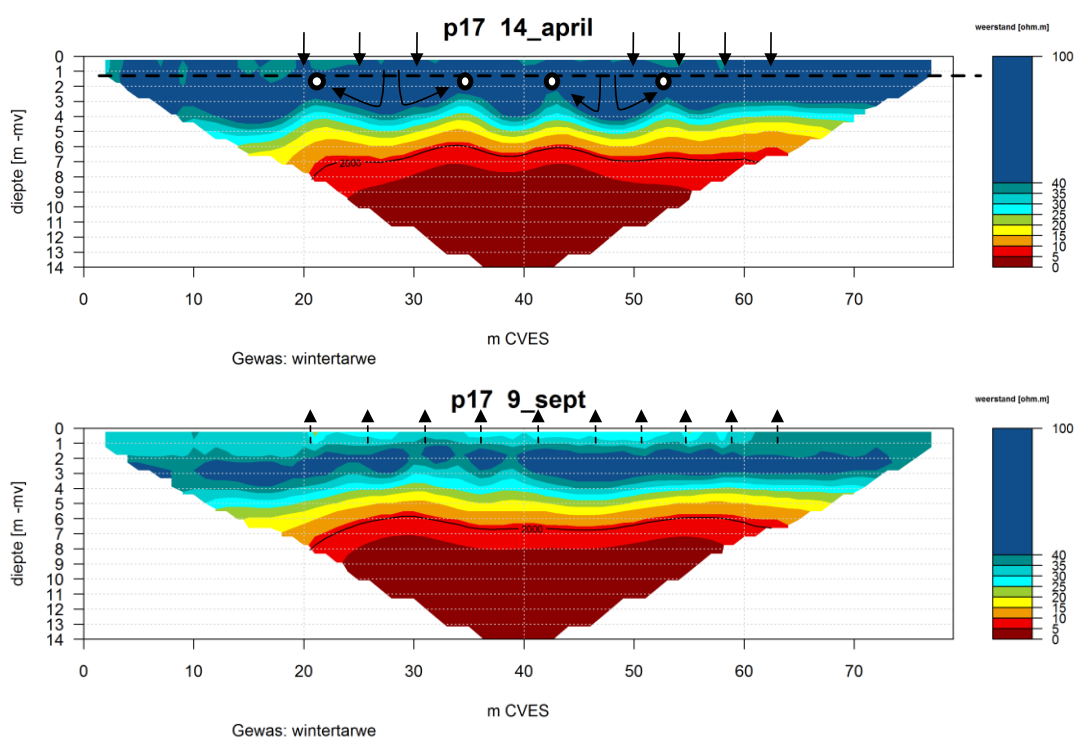
4.6.1 Kwelpercelen en infiltratiepercelen.

Eén van de meest bepalende parameters voor de verdeling van zoet en zout grondwater in een perceel is de regionale kwel- of infiltratiestroming. Binnen de selectie van percelen komen zowel altijd kwellende en altijd infiltrerende percelen voor. Bij sommige percelen is gedurende een tijd van het jaar sprake van een kwelflux door het uitzakken van de grondwaterstand, zoals vaak in de zomer. In de winter treedt dan meestal een infiltratiesituatie op vanwege de stijging van de grondwaterstand door het neerslagoverschot.

Of er kwel of infiltratie op een perceel is, is afleidbaar uit het weerstandsbeeld van een CVES-meting. Dit wordt hiervolgend toegelicht aan de hand van twee (extreme) voorbeelden.

Figuur 4.13 toont de twee metingen van perceel 17, Uithuizen. Het perceel ligt in het noordoosten van Groningen en is gesitueerd op een hogere zandige rug. Alleen de bovenste 80 cm bestaat uit – overigens sterk zandige – klei. Door de hogere ligging is sprake van een (jaarronde) infiltratiesituatie naar de omgeving.

Uit de figuur blijkt dat de 2000 mg/l contour tussen de 6 en 7 meter onder maaiveld ligt en niet tot aan de drains komt. Dit is zowel in april als in september het geval. Vanwege de infiltratiesituatie komt het zoute water niet tot aan het oppervlak.



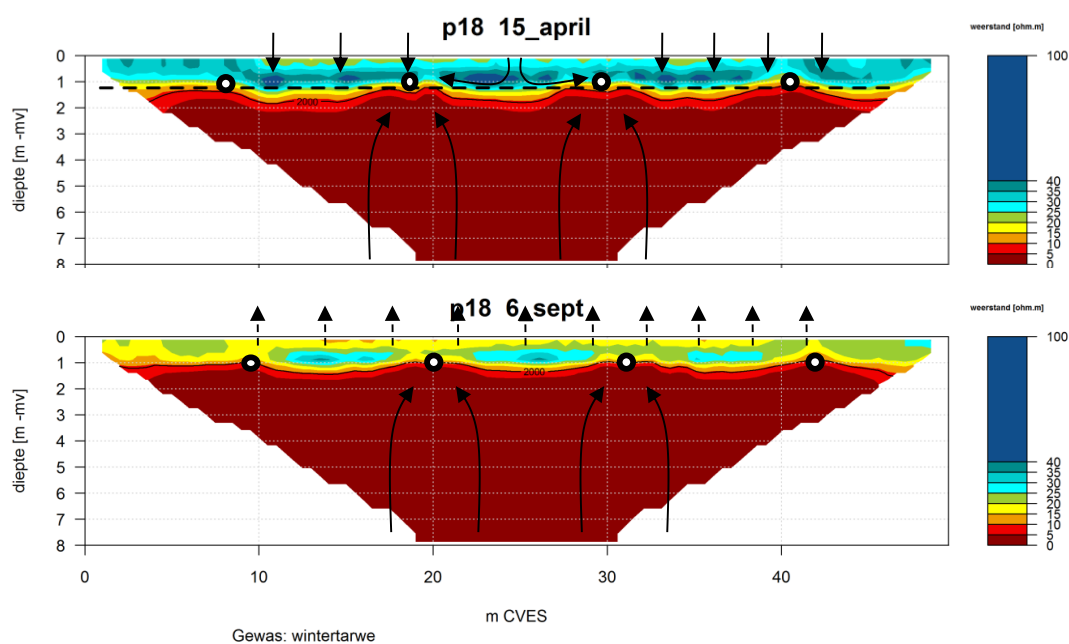
Figuur 4.13: Weerstandsmetingen met CVES in april en september; perceel 17 Uithuizen.

In de meting van april is wel heel duidelijk het effect van drains zichtbaar. Ondanks de relatief grote diepte van het zout wordt zout grondwater door de drains omhooggetrokken, wat zich uit in een soort "vingers" in de richting van de drain. De diepte van de 2000 mg/l contour verandert echter nauwelijks.

Bij een perceel met veel kwel ziet men de situatie zoals weergegeven in Figuur 4.14. Deze metingen zijn gedaan bij Voorrijp in Noordwest-Friesland. De bodem in het perceel bestaat uit lichte zavel en is dus hydrologisch gezien redelijk doorlatend. Er liggen landbouwdrainen op ongeveer 8 tot 14 meter uit elkaar. De drains liggen op ongeveer 1.30m onder maaiveld.

Tabel 4.3: Overzicht percelen, kwel uit MIPWA en kwel afgeleid uit systeemgedrag CVES-metingen

Nr	Locatiennaam	Kwel Mipwa (mm/d)	Kwel CVES	Verklaring afwijking
1	Sexbierum	-0.23	infiltratie	Lokaal hoger gelegen perceel
2	Den Andel	0.02	infiltratie	
3	Kruisweg	-0.90	infiltratie	Lokaal hoger gelegen perceel
4	Herbajum	-0.32	kwel	
5	Koedijk Nieuwe Bildtzijl	-0.05	alternerend	
6	Langrousterwei Oosternijkerk	0	alternerend	
7	Hantummerburen	-0.04	kwel	
8	Finsterwolde	0.27	? Bodemeffecten	
9	Zeerijp	-0.14	kwel	
10	Fraamklap Middelstum	-0.20	kwel	
11	Trekweg Rottum	0	alternerend	
12	Anjum	-0.40	kwel	
13	Blessum	-0.05	kwel	
14	Nieuwolda	-0.01	kwel	
15	JohannesKerke Woldendorp	-0.70	kwel	
17	Uithuizen	0.20	infiltratie	
18	Voorrijp Sexbierum	-0.76	kwel	
19	Vrouwenparochie	-0.25	infiltratie	Lokaal hoger gelegen perceel



Figuur 4.14: CVES weerstandsmetingen op perceel 18, Voorrijp

Uit de figuur blijkt dat het grootste deel van de figuur brak grondwater weergeeft. Het brakke grondwater komt in het hele jaar tot aan de drains. Vanwege de grote kwelflux voeren deze drains altijd chloriderijk water af. Op de stukken van het perceel tussen de drains ontstaat een zoetwaterlens van maximaal enkele decimeters dik.

Opvallend is dat de drains het zoute water aantrekken, maar ook een barrière vormen tegen het opkwellende zoute grondwater.

Bij een perceel met veel kwel ziet men de situatie zoals weergegeven in Figuur 4.14. Deze metingen zijn gedaan bij Voorrijp in Noordwest-Friesland. De bodem in het perceel bestaat uit lichte zavel en is dus hydrologisch gezien redelijk doorlatend. Er liggen landbouwdrains op ongeveer 8 tot 14 meter uit elkaar. De drains liggen op ongeveer 1.30m onder maaiveld.

Tabel 4.3 toont een overzicht in welke van de percelen er sprake is van een kwelsituatie, een infiltratiesituatie of een gedurende het jaar alternerende kwel/infiltratiesituatie

Percelen 1,3 en 19 hebben het systeemgedrag van een infiltrerend perceel, maar zouden volgens het MIPWA model in een kwellend systeem moeten liggen. Dat dit niet zo is, komt omdat ze alle drie op plaatselijk hogere delen liggen ten opzichte van de omgeving waardoor ter plaatse een zeer lokaal infiltrerend systeem bestaat. De maaiveldhoogten op de respectievelijke percelen zijn ruim boven NAP: 0.65 m , 1.55 m en 0.78 m + NAP.

In perceel 8 is het moeilijk om het grondwatersysteem te interpreteren vanwege heterogeniteiten in de bodem.

De overige percelen tonen een congruent beeld tussen de resultaten van het MIPWA-model en het systeemgedrag dat is afgeleid uit de CVES-metingen.

4.6.2 Effect van drainagebuizen

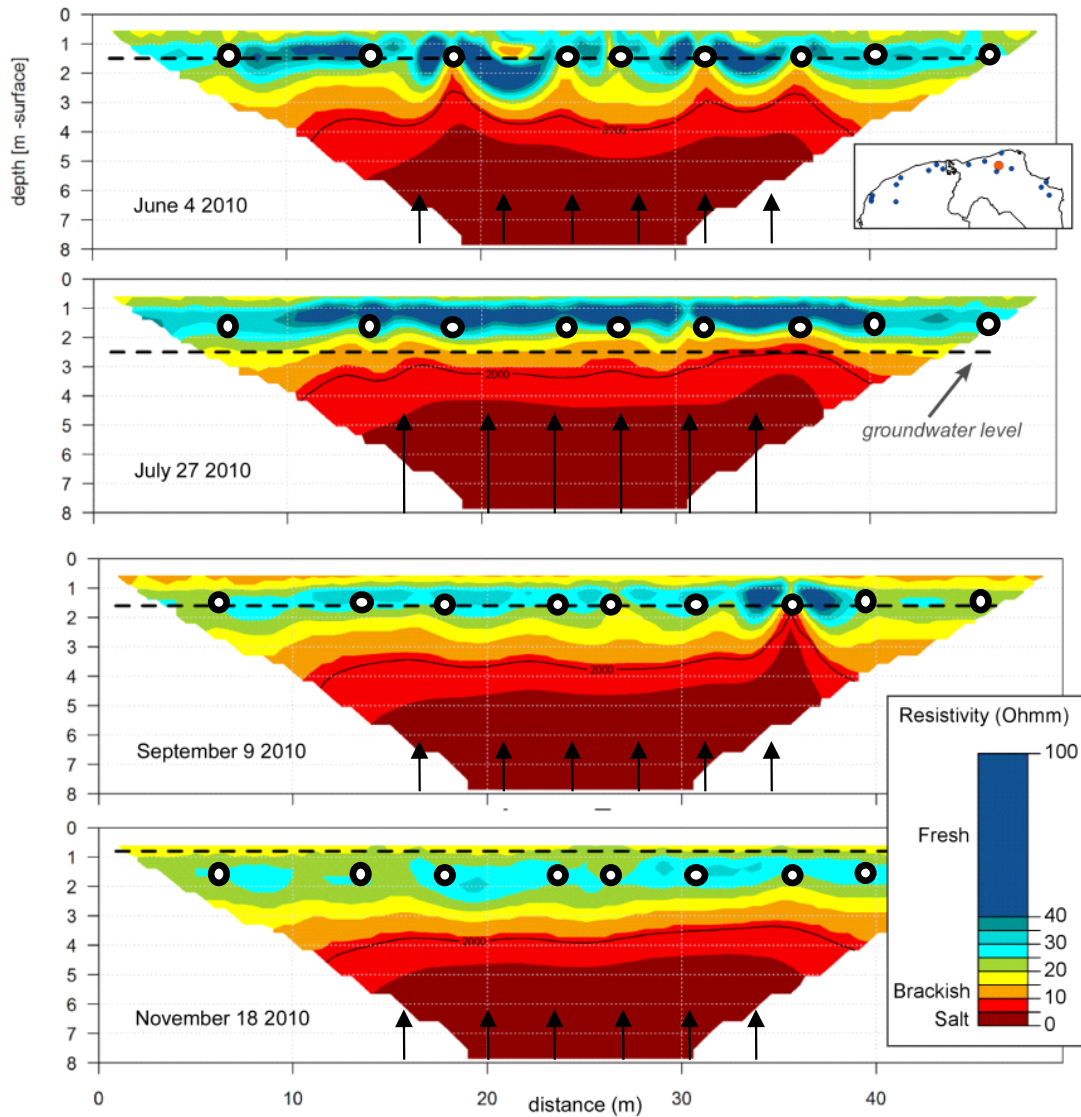
Uit Figuur 4.14 en Figuur 4.15 blijkt, naast het effect van kwel, het grote effect dat de perceelsdrainage heeft op het grondwatersysteem in het perceel. In bijna alle weerstandsmetingen is het optrekkende effect van een lopende drain gedurende een groot deel van het jaar zichtbaar. Er zijn enkele uitzonderingen. Deze worden besproken in paragraaf 4.6.6

Het effect van de drains op het brakke grondwater is goed zichtbaar in de vijf metingen van het continuperceel 11 in Rottum. In perceel Rottum is er sprake van een afwisseling van kwel en infiltratie afhankelijk van een neerslagtekort of een neerslagoverschot.

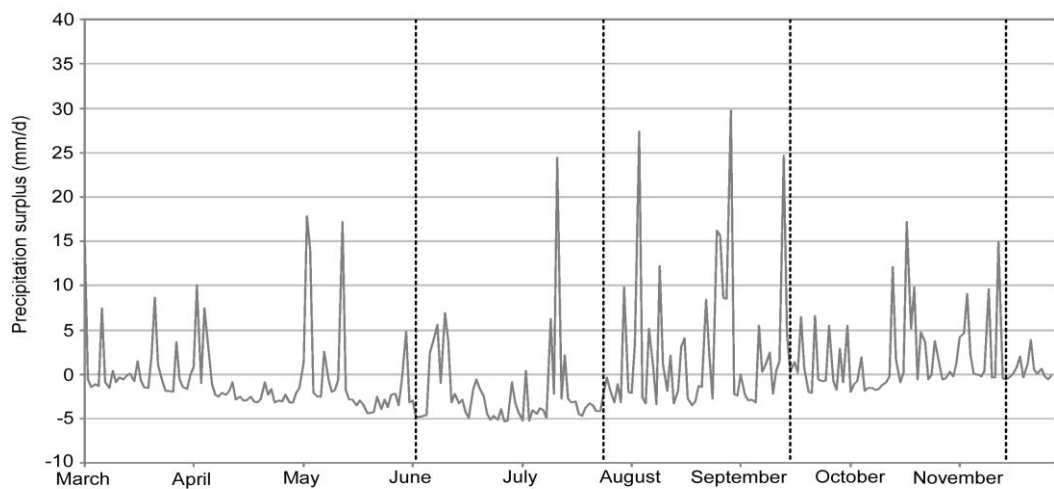
Figuur 4.15 toont achtereenvolgens vier CVES-metingen die zijn gedaan in 2010. De meting van 1 april toont een vergelijkbaar beeld als die van 11 november.

De weerstandsmeting van 4 juni toont een situatie waarbij alle drains actief zijn en zout grondwater afvoeren. De reden dat de drains op deze datum "lopen" is dat een periode met regenval voorafging aan 4 juni. Dit is zichtbaar in Figuur 4.16.

In de meting van 27 juli kan men zien dat er geen sprake is van stroming naar de drains. De grondwaterstand ligt door een lange droge periode onder de drains, dus de drains werken niet. De zoutvingers die op 4 juni zijn waargenomen zijn uitgezakt. De 2000 mg/l contour is nu gemiddeld genomen 50 cm hoger dan tijdens de meting van 4 juni en ligt nu op ongeveer drie meter onder maaiveld. De vermoedelijke reden hiervoor is dat de kweldruk is toegenomen door de uitzakkende grondwaterstand. Hierdoor wordt zout water in de richting van het maaiveld getransporteerd

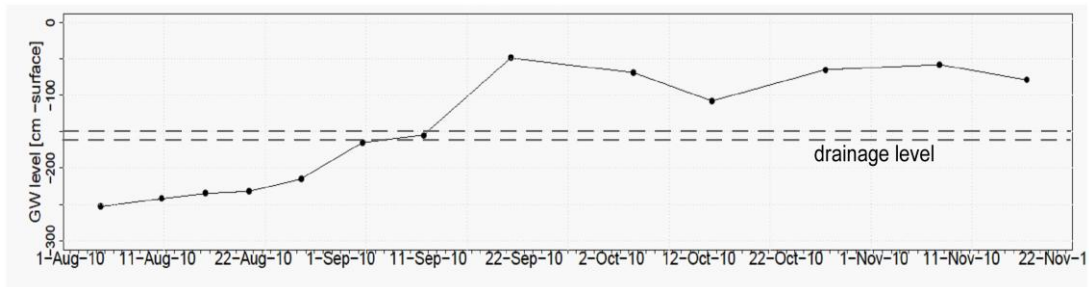


Figuur 4.15: CVES weerstandsmetingen Rottum tot 9 september



Figuur 4.16: Neerslagoverschot Groningen in mm/d (neerslagreeks station Middelstum minus verdampingsreeks van station Eelde)

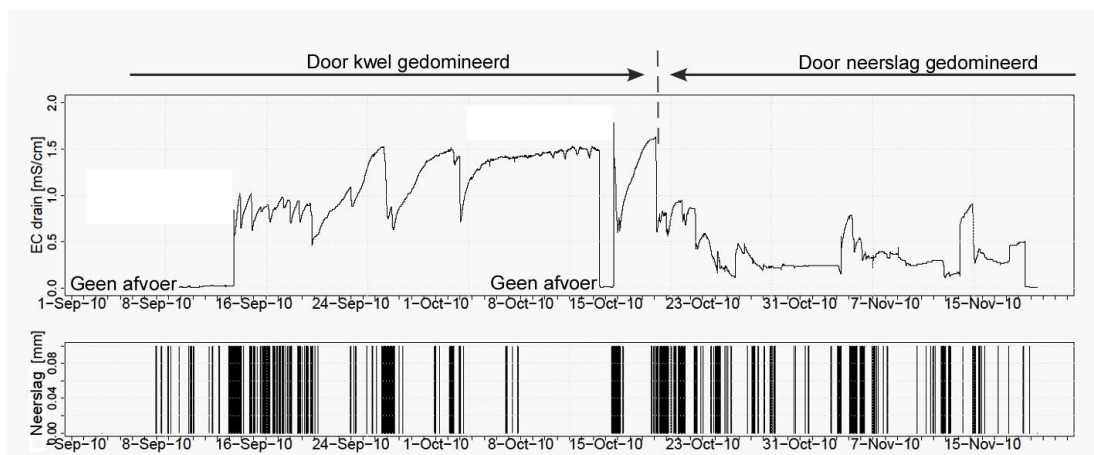
De meting van 9 september toont een situatie waar na een periode van neerslagtekort er sprake is van neerslagoverschot. De grondwaterstand is stijgende en heeft ten tijde van de CVES-meting de ondieper liggende drain aan de rechterkant van de doorsnede bereikt. De overige drains liggen ondieper en deze zijn nog niet in werking. De grondwaterstandsmetingen in een peilbuis tussen de drains getoond in Figuur 4.17 bevestigen het beeld dat de CVES laat zien. Na 11 september is sprake van een grondwaterstand boven het niveau van de drains, zodat deze weer grondwater afvoeren.



Figuur 4.17: Grondwaterstand en drainageniveau in Rottum

De meting van 18 november toont de hydrologische situatie op het perceel na een langdurige periode van neerslagoverschot. De zoutvingers van de drain zijn niet meer zichtbaar omdat er geen of nauwelijks kweldruk meer is door de hoge grondwaterstand. De drains voeren nu voornamelijk zoet water af.

Deze overgang van een kwellend systeem naar een infiltrerend systeem is ook goed zichtbaar in de continue EC-metingen die vanaf 1 september van het drainwater zijn gemaakt. Figuur 4.18 toont het verloop van de EC in een drain op het perceel Rottum. De onderste figuur toont de intensiteit van neerslag zoals gemeten door de regenmeter op het perceel. Bij een periode van intensieve neerslag, zoals op 16 september is er een grote dichtheid van streepjes, waardoor periodes van flinke buien herkenbaar zijn.



Figuur 4.18: EC-meting in de drain op perceel Rottum. De onderste grafiek toont de intensiteit van neerslag

In de figuur is wederom duidelijk te zien dat de drain waarin de diver is geplaatst rond 11 september actief is geworden. Het water dat de drain afvoert in de week van 11 tot 18 september is een combinatie van brak kwelwater en zoet regenwater waardoor de EC ongeveer 1 mS/cm is. Bij periodes van droogte bestaat het drainwater voor een groter deel uit kwelwater en loopt de geleidbaarheid op tot 1.5 mS/cm.

Na ongeveer 20 oktober neemt de EC in de drain af. De reden hiervoor is dat door afnemende verdamping en toenemende neerslaghoeveelheden het systeem een infiltrerend systeem wordt met bijbehorende "zoet" drainwater.

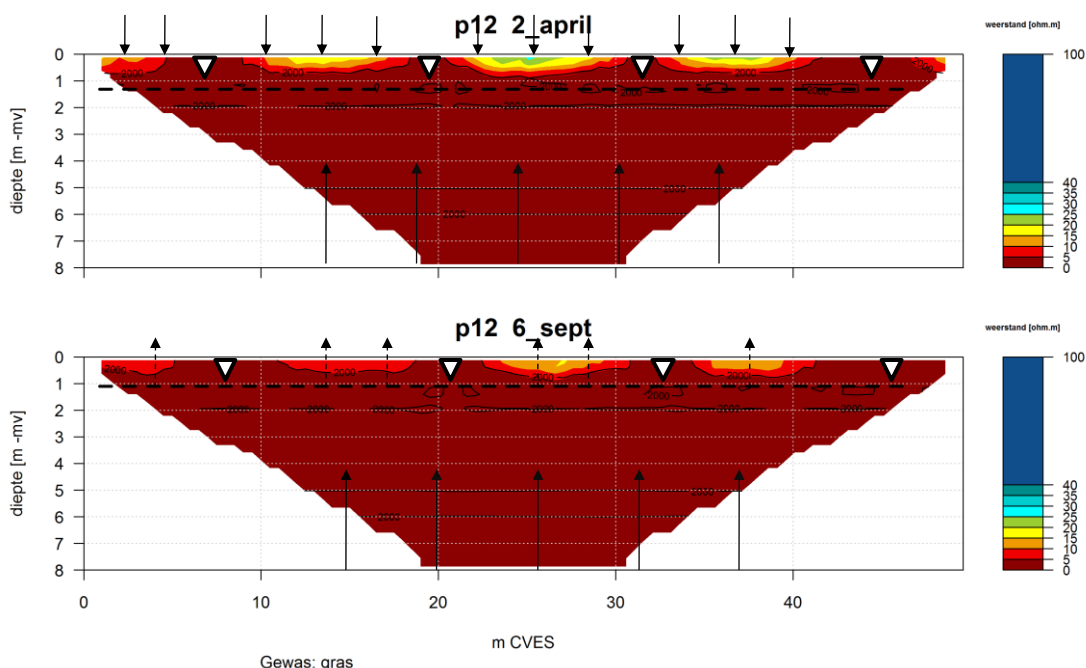
Samengevat: in de droge periode voorafgaand aan 20 oktober is de kwel zeer bepalend voor het verloop van het zoutgehalte in de drains van perceel Rottum. Nadien wordt het systeem beheerst door regenwater.

4.6.3 Greppels en drains

Uit de inventarisatie in hoofdstuk 3 is gebleken dat drainagebuizen op 90% van de percelen het drainagemiddel zijn in Noord-Nederland. Toch komen percelen met greppels ook voor. Dit is met name op de zwaardere percelen (knipklei) dat veelal als grasland in gebruik is.

Een voorbeeld van een dergelijk perceel is perceel 12 te Anjum. De bodem in dit perceel bestaat uit een dikke laag klei met veeninschakelingen. Er is sprake van een slecht doorlatende bodem. Vanwege de lage ligging van de polder is er sprake van kwel.

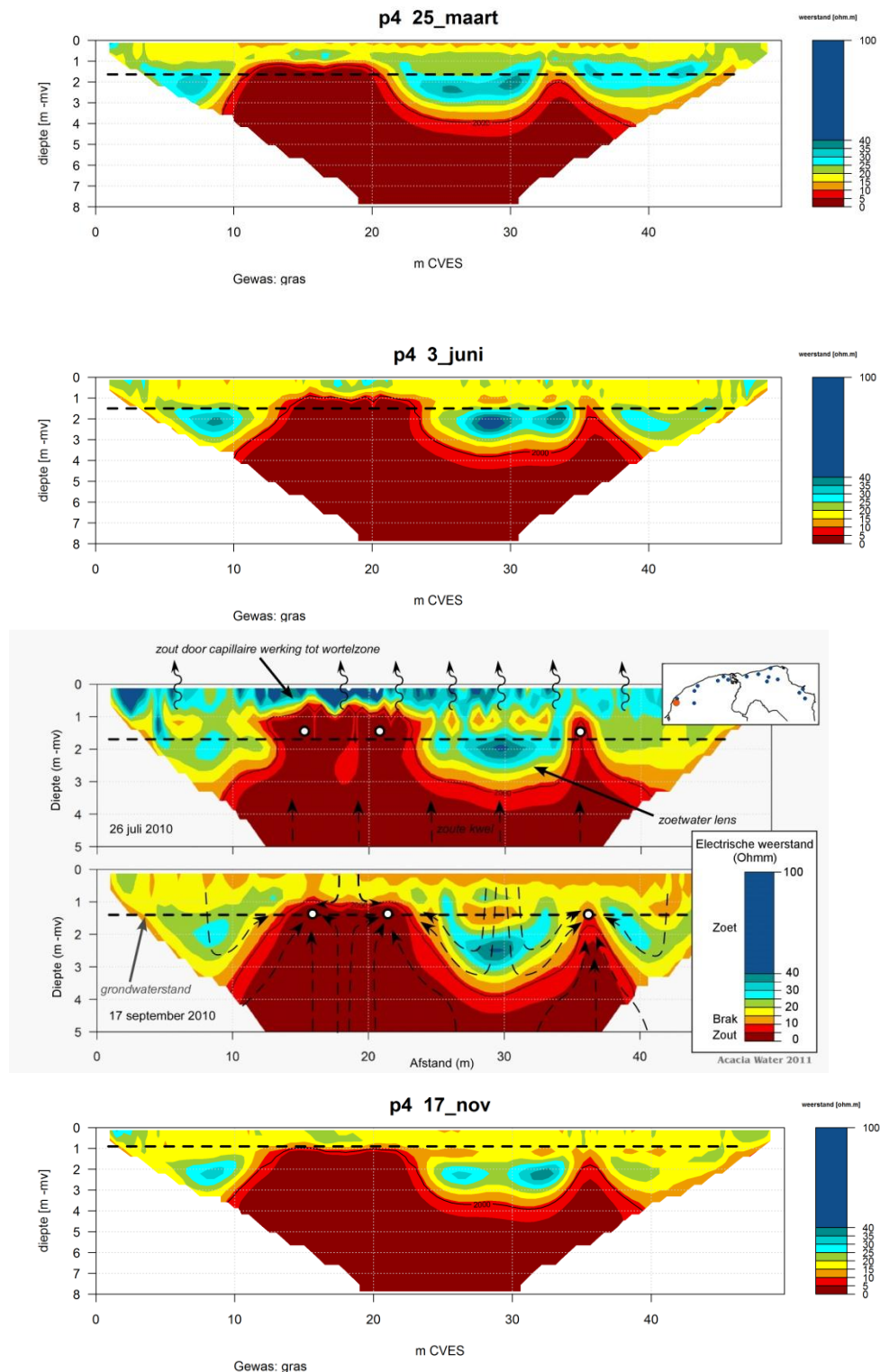
Uit de figuur blijkt dat in bijna het gehele perceel het grondwater zout is. Na een natte periode zoals voorafgaand aan 2 april vormt zich een dunne zoetwaterlens tussen de greppels. Opvallend is dat het grondwater onder en naast de greppel altijd zout blijft. De zoetwaterlens reiken niet tot aan de greppel. Vergeleken met de gedraineerde percelen kan het zoute grondwater bijna tot aan maaiveld komen.



Figuur 4.19: CVES weerstandsmeting, perceel 12, Anjum. Perceel is begreppeld

4.6.4 Het krimpen van de zoetwaterlens

Op de percelen met een duidelijk aanwezige kwelcomponent vormt zich tussen de drains een zoetwaterlens. Dit effect is zichtbaar op de meeste percelen. Een duidelijke zoetwaterlens is zichtbaar op perceel 4, Herbaijum. Dit perceel is gedurende 2010 vijf keer bemeten met een CVES, waardoor goed een inschatting kan worden gemaakt van het krimpen en weer uitdijen van de zoetwaterlens.



Figuur 4.20: CVES weerstandsmetingen gedurende 2010 op perceel 4, Herbaijum

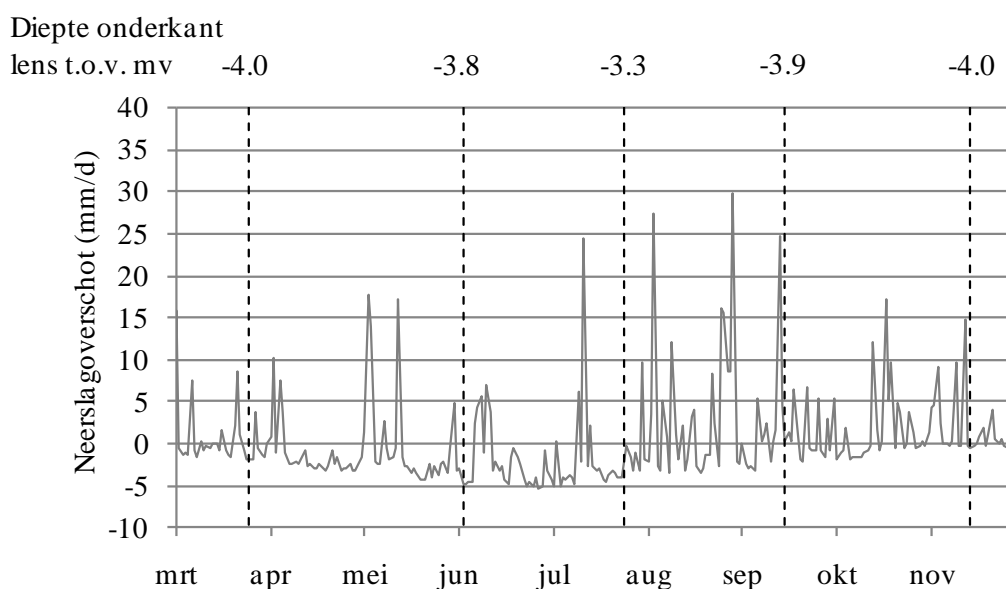
Figuur 4.20 toont de vijf CVES-metingen die gedurende 2010 op perceel Herbaijum zijn gezet. Opvallend aan perceel Herbaijum is de zoetwaterlens tussen circa 20 en 30 meter van het begin van de CVES en de grote vlek met lage weerstand tussen ca 10 en 20 meter. Deze laatste is veroorzaakt door de aanwezigheid van een gedempte sloot, waarin twee drains op enkele meters van elkaar zijn geplaatst. Het materiaal waarmee de sloot is gedempt is niet anders dan de rest van het perceel. De bodem van perceel Herbaijum bestaat uit zavelige gronden in de bovenste twee meter, waarna de bodem overgaat in

fijne tot matig grove zanden. Er is sprake van kwel op het perceel; in 2010 werd op het perceel gras geteeld. De drains liggen ongeveer 8 tot 10 meter uit elkaar. De geschatte draandiepte is 1.20 m onder maaiveld.

In de figuur is te zien dat tijdens de meting voorafgegaan door een natte periode de onderzijde lens – gedefinieerd als de diepte van de 2000 mg/l contour – zich zich op +/- 4 meter onder maaiveld bevindt. Na de periode met neerslagtekort is de lens gekrompen tot 3.30 onder maaiveld (~2.10 onder het niveau van de drains).

Opvallend aan de vorm van de zoetwaterlens is dat deze een wat grillige vorm krijgt wanneer deze krimpt, terwijl in perioden van zoetwateraanvulling deze een meer "bol" theoretisch uiterlijk heeft. Dit wordt verklaard door de aanwezigheid van neerwaartse druk door een hoge grondwaterstand in een periode met neerslag. Deze druk is in een periode van droogte niet aanwezig. Het krimpen van de lens door verdamping verloopt grilliger.

Figuur 4.21 toont de diepte van de 2000 mg/l contour gedurende het jaar in een figuur met de grondwateraanvulling. De grondwateraanvulling is de neerslagreeks van neerslagstation Herbaijum min de verdampingsreeks van KMNI-station Eelde



Figuur 4.21: Grondwateraanvulling Herbaijum en diepte van de 2000 mg/l contour ten opzichte van maaiveld in het midden van de lens

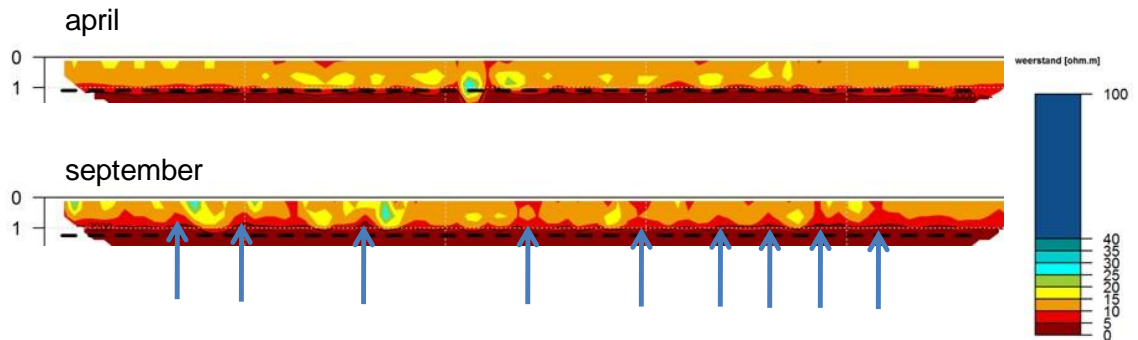
4.6.5 Zout boven de drains

In deze studie zijn de veldonderzoekmetingen gericht op het meten van de verandering van chloridegehalte in het verzadigd grondwater. Niettemin zijn uit de verschillende metingen die zijn gedaan aanwijzingen dat er zout (hang)water boven de grondwaterspiegel ontstaat in droge periodes.

Bij verschillende percelen, bijvoorbeeld perceel 14, Niewolda of perceel 4 Herbaijum ziet men op de CVES-weerstandfiguur dat tijdens het groeiseizoen kleine pieken van lage weerstand zich boven het drainageniveau bevinden. Deze pieken zitten er niet gedurende het natte seizoen en kunnen dus geen bodemartefacten zijn.

Figuur 4.22 toont de bovenste meter van perceel 14 Niewolda. Dit is een perceel met kwel waar brak en zout grondwater zich op drainniveau bevindt. Er is geen

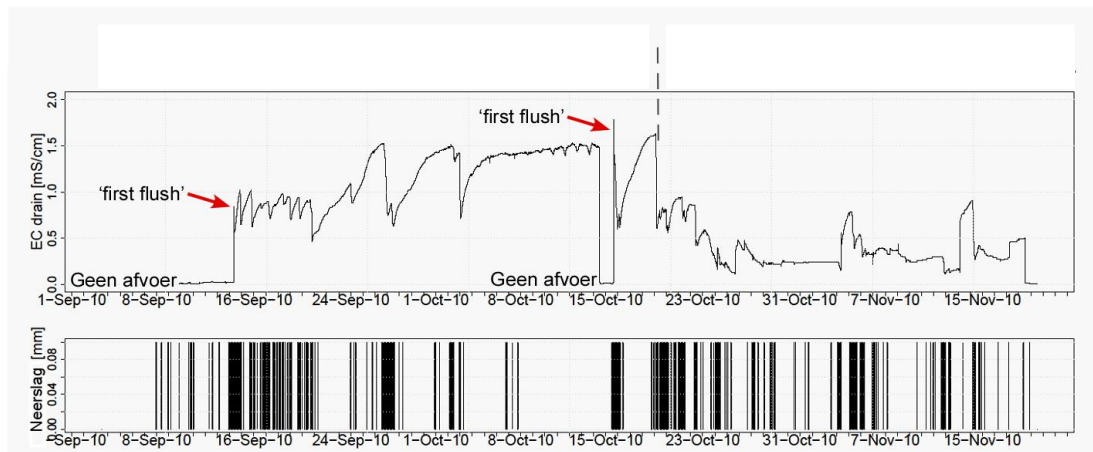
zoetwaterlens. De bodem bestaat uit een dikke laag matig zware klei. De bodem is gedraineerd met buizen die 11 a 12 meter uit elkaar liggen. De gemiddelde drainagediepte is ongeveer een meter. In 2010 is wintertarwe en luzerne geteeld. In september stond de luzerne op het veld. Deze pieken tonen aan dat door capillaire werking en evapotranspiratie het zout in de onverzadigde zone omhoog trekt in de richting van de wortelzone.



Figuur 4.22: Bovenste meter van CVES weerstandsmeting Niewolda in april en september. De pijlen geven lageweerstandspieken aan boven de grondwaterstand, die geassocieerd worden met capillaire opstijging van zout water.

Figuur 4.20 in Herbaijum toont gedurende de zomermaanden eenzelfde beeld waarbij – met name – boven de gedempte sloot er lage weerstanden worden gemeten boven de grondwaterspiegel, die voorheen (bijvoorbeeld in de meting van 25 maart) niet op die hoogte zijn waargenomen. In de gedempte sloot is de drainageafstand klein, waardoor zich geen lens heeft kunnen vormen.

Een andere aanwijzing dat er zich soms zout in het hangwater boven de grondwaterspiegel bevindt, blijkt uit het volgende. Figuur 4.23 toont de gemeten EC in de drain bij perceel Rottum.



Figuur 4.23: 'first flush' in EC in drain in perceel Rottum

Het gaat om het moment dat een drain na een langere droge periode weer begint te lopen doordat de grondwaterstand stijgt. Uit de figuur blijkt dat de geleidbaarheid in de drain meteen hoog is. Op 15 oktober is deze zelfs hoger dan in de voorgaande en navolgende periode als de drain een mengsel van kwelwater en regenwater afvoert. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de neerslag eerst de poriën met zout grondwater boven de drain uitspoelt, waardoor er een "first flush" van zout grondwater ontstaat.

Ditzelfde fenomeen is aangetoond in diverse metingen in de Schermer in het kader van het project Leven met Zout Water (Acacia Water, 2011).

4.6.6 Ongerijpte grond

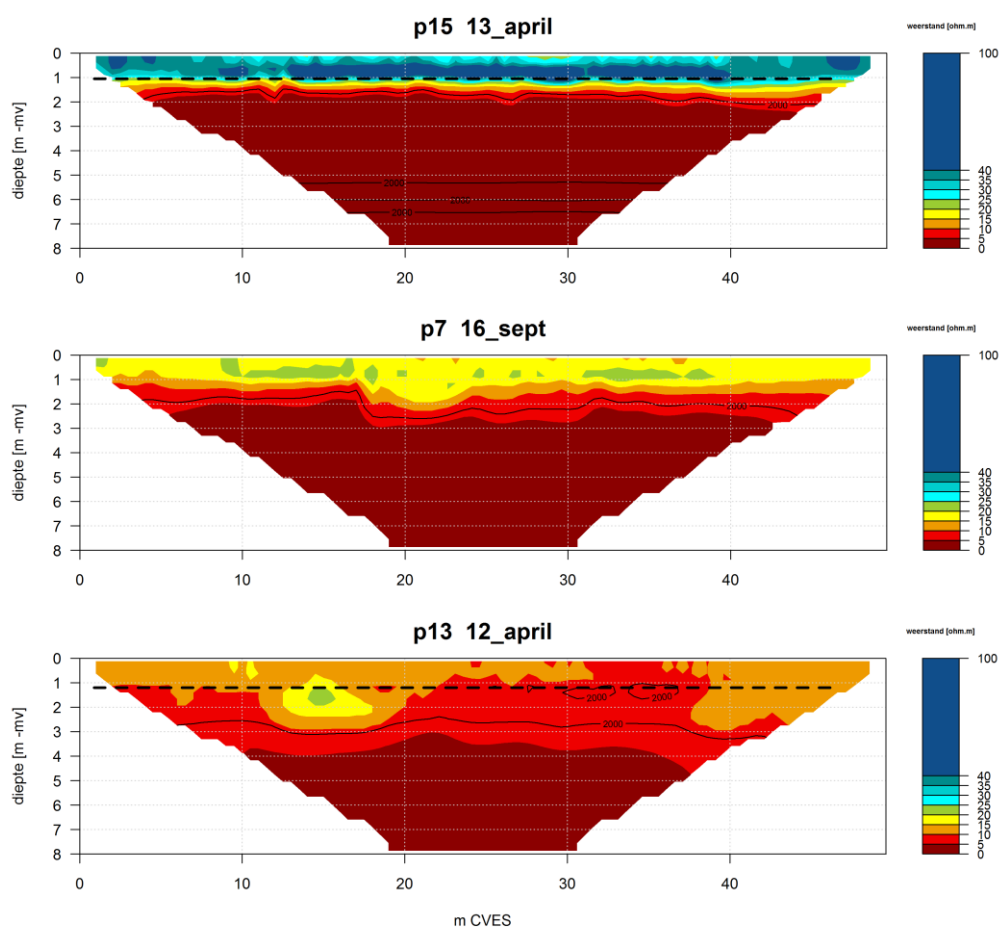
Bij een aantal percelen reikt het zout altijd tot aan het drainageniveau en vormt zich gedurende het jaar geen zoetwaterlens. Dit bleek al uit Figuur 4.22 bij perceel Niewolda, maar het komt ook voor bij percelen 7,13, 15 en mogelijk op perceel 8, hoewel de meting hier wordt verstoord door heterogeniteit in de bodem. Deze percelen hebben gemeen dat het allen (behalve perceel 15) zware kleigronden zijn. Perceel 15 in de Johanneskerkhovepolder heeft een licht zavelige bovengrond, maar een kleiige ondergrond.

Deze percelen hebben gemeen dat zij alle ongerijpte of halfgerijpte grond onder het drainiveau hebben.

Ongerijpte verzadigde klei is zeer slecht doorlatend. Omdat zich geen zoetwaterlens instelt op het ondiep voorkomende brakke grondwater wordt blijkbaar het neerslagwater via de drainage min of meer horizontaal door de bouwvoor afgevoerd.

Deze situatie kan worden beschreven als gescheiden hydrologische systemen; te weten een systeem onder de ongerijpte laag en het ondiepe systeem erboven.

Door de zeer slechte doorlatendheid van de ongerijpte klei is geen brakwater transport naar de drains en geen transport van zoet water mogelijk onder drainiveau.



Figuur 4.24: Percelen zonder duidelijk zichtbare zoetwaterlens, waarschijnlijk als gevolg van zeer slecht doorlatende ongerijpte klei.

4.7 Discussie en conclusies

Uit de weerstandsmetingen met de CVES zijn veel inzichten afgeleid over de dynamiek van het stromingssysteem op een perceel met drainage of greppels. De inzichten worden onderbouwd door ondersteunende metingen zoals grondwaterstanden en geleidbaarheidsmetingen van het draineffluent.

Verziltingsprocessen percelen

Samengevat komen we tot de volgende inzichten voor de percelen in Noord-Nederland, waar een risico van verzilting is (waar het zoutzout grensvlak op minder dan 5 meter onder maaiveld ligt, zie paragraaf 3.3.2):

- Kwel is een zeer belangrijke parameter voor de dynamiek van zoet en zout op een perceel. Dit geldt in het algemeen maar in het bijzonder voor de percelen in Noord-Nederland, die over het algemeen zo grote slootafstanden hebben, dat het effect van drainerend oppervlaktewater niet meer merkbaar is op het midden van de percelen.
- Bij een voortdurende infiltratiesituatie is de bovenkant van het verzadigd grondwater, de grondwaterspiegel, altijd zoet.
- Bij een voortdurende kwelsituatie is onder de drains steeds sprake van chloriderijk brak grondwater. Tussen de drains vormt zich meestal, afhankelijk van de periode van droogte of grondwateraanvulling, een zoetwaterneerslaglens.
- De dikte van de zoetwaterlens varieert gedurende een hydrologisch jaar. Perceel Herbaijum leert dat in de zomer van 2010 de zoetwaterlens maximaal 70 centimeter kromp. Hoewel 2010 zeer droog begon, is vanwege de natte nazomer het een gemiddeld nat jaar.
- Buisdrainage en greppels leiden tot optrekking van zout grondwater. Diepte en onderlinge afstand bepalen de plaats waar het zout omhoog wordt getrokken en hoe hoog dit komt.
- De invloed van afvoerende drainagebuizen reikt tot enkele meters diep. Van deze diepte kan zout worden opgetrokken.
- De drainagebuizen lijken een effectieve barrière te vormen tegen opkwellend brak grondwater, op geen van de percelen komt brak verzadigd grondwater boven het drainageniveau.
- De diepte van de drains lijkt dan ook een beperkende factor te zijn hoe hoog het zout onder het perceel kan komen.
- Het zout wordt alleen opgetrokken wanneer de drains actief zijn. Bij percelen waar een lage regionale kwel is, of waar de kwel omslaat in infiltratie gedurende het seizoen, vallen de landbouwdrains soms droog. Het door de drain omhoog getrokken zout, de "zoutvingers", zakt snel weer uit zonder een duidelijk zichtbare, blijvende, verhoging van het zoutgehalte in het grondwater te veroorzaken.
- Omdat het drainageniveau zeer bepalend is, komt het brakke grondwater bij greppels en bij een permanente kwelsituatie tot aan maaiveld. Tussen de greppels vormt zich wel een zoetwaterlensje, maar deze lijkt zeer dun en te verdwijnen in een droge periode. Het grondwater rondom de greppels lijkt voortdurend brak te zijn.

Verzadigde en onverzadigde zone processen

In de oorspronkelijke opzet van het onderzoek was de focus gericht op het ontstaan en verdwijnen van zoetwaterlenzen. De reden hiervoor is dat algemeen gedacht werd dat gewassen een verziltingsrisico lopen bij afwezigheid van een zoetwaterlens.

Gedurende het onderzoek bleken de zaken niet zo eenvoudig te zijn. We kunnen stellen dat gewassen die zich op een perceel boven een zoetwaterlens bevinden geen risico lopen op verzilting. Dat geldt echter niet voor gewassen die zich direct boven de drains bevinden. De bovenkant van het grondwater is ter plaatse van de drains immers vaak brak bij aanwezigheid van een zoetwaterlens.

Daarnaast is het niet per definitie zo dat er verziltingsschade optreedt aan gewassen bij afwezigheid van een zoetwaterlens. Verzilting van landbouwgewassen is een proces dat zich afspeelt in de wortelzone, in de onverzadigde zone van de bodem.

Door processen in de onverzadigde zone kan de bodem boven de grondwaterspiegel verzilt worden waardoor het chloride de wortelzone van gewassen bereikt. In paragraaf 4.6.5 is op basis van zowel de visuele aanwijzing in de weerstandsmeting van de CVES als de indirecte meting van het chloride boven de drain in de geleidbaarheid van het drainwater geconcludeerd dat het aannemelijk is dat zout water "omhoog wordt getrokken" in de richting van de wortelzone.

De processen die het zout in de onverzadigde zone omhoog trekken zijn de verdamping en capillaire opstijging van het bodemvocht. Of dit gebeurt en de snelheid waarmee dit gebeurt zijn afhankelijk van een aantal processen en factoren.

Ten eerste is het type gewas belangrijk. Gewassen die hun groeiseizoen hebben in een droge periode trekken meer water aan vanuit de diepte waardoor zout grondwater hoger wordt opgetrokken. Daarnaast is de bewortelingsdiepte belangrijk. Gewassen die diep wortelen trekken het zout sneller in de wortelzone dan ondiep wortelende gewassen.

Ten tweede zijn bodemkarakteristieken belangrijk. Fijnere grond heeft een grotere capillaire werking, waardoor brak grondwater dichterbij aan maaiveld kan komen. Bovendien treedt bij het droogvallen van klei krimp op, waardoor scheurvorming kan ontstaan. Door deze scheurvorming veranderen de hydrologische karakteristieken in de bodem gedurende de zomer (van Hoorn, 1984 en van Dam, 2000). In de natte periode zwelt de klei normaliter weer, maar onder bepaalde omstandigheden zijn de kleischeuren irreversibel.

Ten derde is de diepte van drainage zeer belangrijk. Uit de metingen hebben we geconcludeerd dat de drainage een effectieve barrière is tegen het opkwellende brakke grondwater. De capillaire zone begint boven de grondwaterspiegel. De grondwaterspiegel is min of meer gelijk aan het drainageniveau. Hoe dieper de drainage wordt aangelegd, hoe minder kans dat chloride via de onverzadigde zone in de wortelzone komt.

Samengevat kan worden gesteld dat verzilting van landbouwgewassen een gevolg is van een combinatie van processen in het verzadigd en onverzadigd grondwater.

Wanneer het verzadigd grondwater niet verzilt is, dan is er geen gevaar op schade door verzilting van landbouwgewassen. Het is dus belangrijk te weten onder welke omstandigheden de bovenkant van het verzadigd grondwater verzilt.

Wanneer dat laatste het geval is kan onder bepaalde omstandigheden het zout getransporteerd worden naar de wortelzone. Welke deze zijn wordt in de loop van dit rapport onderzocht.

5 OPSCHALING

5.1 Inleiding

De resultaten van de metingen in hoofdstuk 4 tonen ons dat de verzilting op een perceel verschillend kan verlopen, afhankelijk van locatie en karakteristieken van het perceel en het gebied waarin het zich bevindt.

In dit hoofdstuk wordt de stap gemaakt om de inzichten en data uit de hoofdstukken 3 en 4 te vertalen naar een gebiedsdekkende "verziltingsrisicokaart". Het woord "risico" in deze term impliceert een toets aan een norm. Deze norm is vooralsnog moeilijk te stellen. De resultaten uit het parallel aan dit onderzoek verlopen sociaal-economisch spoor zijn noodzakelijk om uitspraken te doen over hoe *erg* de verzilting is voor de landbouwgewassen. De antwoorden op die vraag worden onderzocht in de bundeling van de deelonderzoeken in het syntheserapport.

Wel kunnen we stellen dat er zout in de wortelzone moet komen om te spreken over een potentieel gevaar voor landbouwgewassen. Zowel de processen in het verzadigd grondwater als de processen in de onverzadigde zone spelen een cruciale rol bij de vraag of dit daadwerkelijk optreedt.

Binnen dit onderzoek zijn geen metingen uitgevoerd aan de verziltingsprocessen van de onverzadigde zone. Er is wel modelmatig aandacht besteed aan het optrekken van zout door evaporatie en capillaire werking per gewas en bodemtype. Er is in dit onderzoek niet direct gemeten aan chloride in de wortelzone, waardoor er geen mogelijkheid tot calibratie en verificatie van de onverzadigde zone modellen. Hierdoor moet men voorzichtig zijn om kwantitatieve uitspraken te doen over de resultaten van deze modellen. Wel kunnen de resultaten worden gebruikt om te duiden waarom bepaalde omstandigheden wel, geen, veel of weinig risico betekenen voor de landbouwgewassen.

De opschaling tot de verziltingsrisicokaart beperkt zich dientengevolge tot de processen in de verzadigde zone. Dit is een zeer relevante eerste stap. Er kan tenslotte alleen chloride vanuit het grondwater in de wortelzone komen, wanneer de top van het verzadigd grondwater verzilt is. Het is dus noodzakelijk te weten onder welke omstandigheden dat gebeurt.

Op basis van de beschouwing in paragraaf 4.7 onderscheiden we twee situaties:

- 1) Het grondwater dat door de drain wordt aangetrokken is zout of brak. In dit geval is maar een klein deel van de grondwaterspiegel verzilt en loopt dus ook een klein deel van het landbouwperceel risico. Ter plaatse van de drain kan zout water door capillaire opstijging en verdamping in de wortelzone komen.
- 2) De zoetwaterlens tussen de drain verdwijnt geheel. In dit geval is de gehele grondwaterspiegel verzilt. Over het gehele perceel kan zout water door capillaire opstijging en verdamping in de wortelzone komen.

Hoewel in de eerste situatie eveneens sprake is van een risico op verzilting kiezen wij ervoor om ons te beperken tot die gebieden waar de zoetwaterlens geheel kan verdwijnen.

In de volgende paragrafen worden inzichten metingen en modelresultaten opgeschaald tot een kaart van potentieel verziltingsrisico, waarbij de definitie van verziltingsrisico is:

"als op enig moment in de tijd de zoetwaterlens onder een perceel in zijn geheel verdwijnt".

5.2 Opzet

Omdat wij niet beschikken over meetresultaten op ieder perceel is het nodig om de dynamiek van de zoetwaterlenzen in de percelen in Noord-Nederland te voorspellen met behulp van een numeriek grondwatermodel.

In principe kan een model worden gemaakt van iedere combinatie van invoerparameters die van invloed zijn op de dynamiek van de zoetwaterlens. Dit leidt echter tot een gigantische hoeveelheid modelberekeningen, die niet praktisch toepasbaar is. Daarom wordt eerst een selectie gemaakt van te variëren parameters en de bandbreedte waarbinnen zij voorkomen binnen het onderzoeksgebied.

Er is een set opgesteld met combinaties van parameterwaarden die representatief zijn voor de dynamiek van zoetwaterlenzen in Noord-Nederland. Elke set van parameterwaarden vormt een modelscenario waarmee een modellendatabank of metamodel wordt gevuld. Door het combineren van ruimtelijke gis-informatie met de resultaten van de modellendatabank wordt tenslotte de gebiedsdekkende kaart afgeleid.

Welke parameters relevant zijn voor opschaling, hoe de modellendatabank wordt gevuld en wat dit betekent voor de verziltingsrisicokaart wordt besproken in paragraaf 5.4

Paragraaf 5.3 beschrijft de opzet en de uitgangspunten van het model, de calibratie aan de meetgegevens en een gevoeligheidsanalyse die helpt te bepalen welke parameters bepalend zijn voor de voorspelling van het verziltingsrisico.

Hoofdstuk 6 beschrijft vervolgens hoe de modelresultaten vertaald worden naar de huidige en toekomstige verziltingsrisicokaart.

5.3 Model

5.3.1 Uitgangspunten

We maken onderscheid tussen verzadigde zone modellering en onverzadigde zone modellering. Hoewel er inmiddels veel voortgang wordt geboekt in het integreren van de vergelijkingen die stroming boven en onder de grondwaterspiegel beschrijven, is er op dit moment nog geen volwaardige modelcode beschikbaar die het gehele systeem goed beschrijft.

De resultaten van de verzadigde zone modellering worden gebruikt voor de opschaling van de inzichten uit het veldwerk naar de gebiedsdekkende kaart.

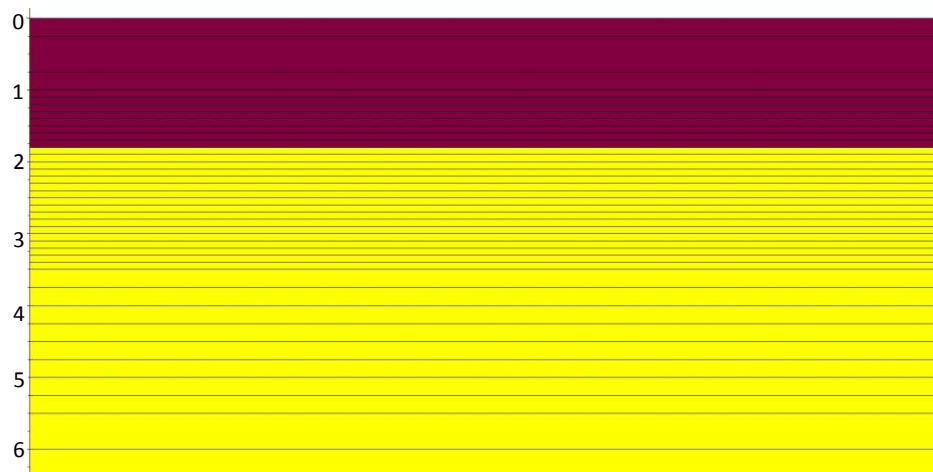
De resultaten van de onverzadigde zone modellering worden kwalitatief gebruikt om voor een reeks aan mogelijke grond/gewas combinatie te duiden welke combinaties het meest kwetsbaar zijn voor verzilting. Deze resultaten worden gepresenteerd in paragraaf 6.4.

Voor het modelleren van het verzadigde grondwater wordt gebruik gemaakt van het programma SEAWAT (Langevin et al 2008). SEAWAT is een aanpassing op het 3D grondwater/stoftransportmodel MODFLOW/MT3D, speciaal ontwikkeld voor dichtheidsstromingsberekeningen in brak en zout grondwater.

Het SEAWAT model moet geschikt zijn om:

- De dynamiek van de zoetwaterlens onder veranderende omstandigheden goed te beschrijven
- Het chloridegehalte in de drain te kunnen voorspellen

Hiertoe is een 3D perceelsmodel gemaakt van 40 modellen gemaakt, waarin de tweedimensionale stroming naar en tussen de drains kan worden gemodelleerd. De dikte van de modellen varieert van 10 cm rondom de drains tot 3 meter in de onderste cel. Het model is 15 meter diep.



Figuur 5.1: Lagenopbouw van het basismodel met een slecht doorlatende laag van 2 meter. De bovenste 6 meter onder maaiveld is getoond.

Stroming vindt alleen plaats in het horizontale en verticale vlak. De stroming in het vlak parallel aan de drains wordt niet berekend.

In het perceelsmodel zijn de drains expliciet opgenomen. Dit betekent dat de celgrootte van een cel met drain 10 cm is. Dit is nodig om de radiale weerstand naar de drain goed te kunnen simuleren.

Verder is uitgegaan van een geheel verzadigd perceel en niet van freatisch grondwater. De reden hiervoor is dat de modelcode SEAWAT bij complexe berekeningen stabiliteitsproblemen heeft met het rekenen met een freatisch vlak. Uit het vergelijken van berekeningen met een freatisch perceelsmodel en een verzadigd perceelsmodel blijkt dat de verschillen in de berekende dikte van de zoetwaterlens of het chlorideverloop in de drain klein zijn en dat de modelfout in het niet valt bij die veroorzaakt door de a-priori onzekerheid in de invoerparameters.

De modellen rekenen tijdsafhankelijk met een totale modelleertijd van 10 tot 12 jaar. Een dergelijke lange periode is nodig omdat een dergelijk dynamisch stoftransportmodel pas na geruime tijd een stabiele oplossing laat zien. In het begin van de berekening zijn de tijdstappen 30 dagen. Later, wanneer de oplossing stabiel is, wordt gerekend met tijdstappen van een dag.

5.3.2 Parametrisatie en calibratie verzadigde zonemodellen

Voordat de berekeningen voor het hele gebied gemaakt zijn is het noodzakelijk om de methodiek voor de perceelsmodellen te controleren. Dit kan het beste door perceelsmodellen te maken van de percelen Herbajum en Rottum waarvan veel metingen beschikbaar zijn.

Parametrisatie

De grondwateraanvulling is de bovenrandvoorwaarde van het model en wordt bepaald door de neerslag, verdamping, gewas, bodemtype en diepte van de grondwaterstand. De flux per tijdseenheid is berekend met het onverzadigde zone model SWAP (zie paragraaf 6.4). De parameters neerslag, bodemtype en diepte van de grondwaterstand zijn gemeten in de percelen. De verdamping is betrokken van een nabij gelegen KNMI station.

De kwel is de onderrandvoorwaarde van het model. In het model is dit opgegeven als een vaste flux (in volume en concentratie chloride). De waarde van de kwelflux is afgeleid uit MIPWA. De waarden voor de concentraties zijn afgeleid uit ter plaatse beschikbare metingen uit het DINOLOket.

De afvoer van water en zout in het model kan uitsluitend plaatsvinden via de drainage. De dimensie van de drainage (diepte, onderlinge afstand) is opgemeten in het veld. De toe te kennen drainageweerstand is afhankelijk van meerdere factoren, waaronder de intreeweerstand. De weerstand is ook afhankelijk van de ouderdom en mate van onderhoud. Een in de praktijk minder goed werkende drain heeft een hogere weerstand. De waarde van de weerstand is tevoren niet nauwkeurig bekend. Hierdoor is de weerstand van de drains een parameter waarmee is gevarieerd bij de modelcalibratie.

De permeabiliteit van de bodem is binnen het veldonderzoek bepaald. Deze waarde geeft een goede indicatie van de orde van grootte voor de bovenste modellaag. De wat zandiger en beter doorlatende onderste laag is in eerste instantie een hogere waarde toegekend. De permeabiliteit is dan ook een parameter waarmee is gevarieerd.

De bergingscoëfficiënt bepaalt hoe het watersysteem reageert op veranderingen van aanvoer en afvoer van water. De waarden in het bovenste deel van het model benaderen de porositeit en de daaronder gelegen deel heeft in eerste instantie een waarde dat overeenkomt met literatuurwaarden. De bergingscoëfficiënt is dan ook gevarieerd.

Naast parameters die de stroming van het grondwater bepalen zijn er parameters die het transport van chloride bepalen (stoftransport). Er is gerekend met advectief transport al dan niet in combinatie met dispersie.

Calibratie

Deze modellen zijn geijkt door modelresultaten te vergelijken met de verschillende veldwerkmetingen:

- Dikte van de zoetwaterlens uit de CVES
- Vorm van de zoetzoutverdeling in de ondergrond uit de CVES
- Metingen van de grondwaterstand op verschillende locaties langs de raai
- Ec-waarde van het draineffluent

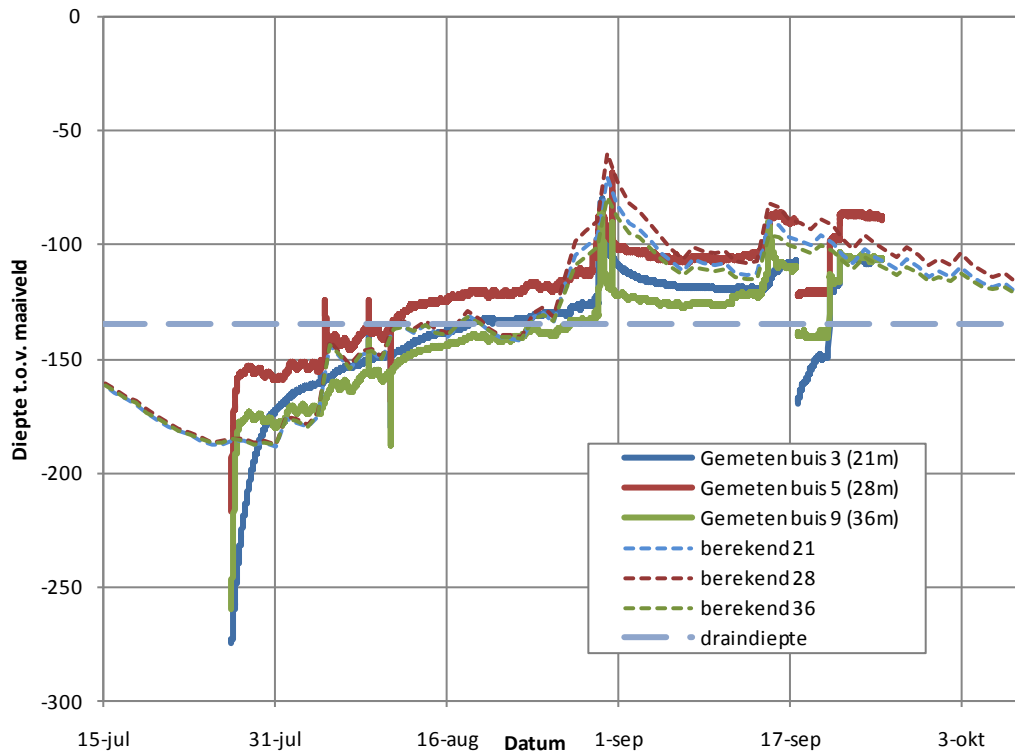
Perceel 4, Herbaijum

De grondwateraanvulling is berekend met SWAP op basis van de informatie van het perceel. De initiële stationaire kwelwaarde is afkomstig uit MIPWA en heeft een waarde van 0.32mm/d (zie Tabel 3.2). De permeabiliteit is voor de zavel is middels een Hooghoudtproef bepaald op ca. 0.15m/d. Initieel is een lagere waarde aangenomen van 0.02m/d van waaruit langzaam is opgebouwd naar andere waarden. Voor de overige parameters wordt verwezen naar tabel 5.1. De tabel toont ook de gewijzigde waarden na calibratie.

Tabel 5.1: parameters perceelsmodel Herbaijum (* K=doorlatendheid)

Parameter	Eenheid	Initieel	Na calibratie
Bovenlaag (zavel)			
Kx=Ky *	m/d	0.02	0.1
Anisotropie (Kx:Kz)	-	1:1	1:1
Bergingscoëfficiënt	-	0.05	0.02
Weerstand drainagebuis	d	0.2	0.2
Dispersielengte	m	geen dispersie	0.35
Onderlaag (zand)			
Kx=Ky *	m/d	0.05	0.5
Anisotropie (Kx:Kz)	-	1:1	2:1
Bergingscoëfficiënt	-	0.03	0.006
Dispersielengte	m	geen dispersie	0.35
Kwelflux	mm/d	0.32	0.35

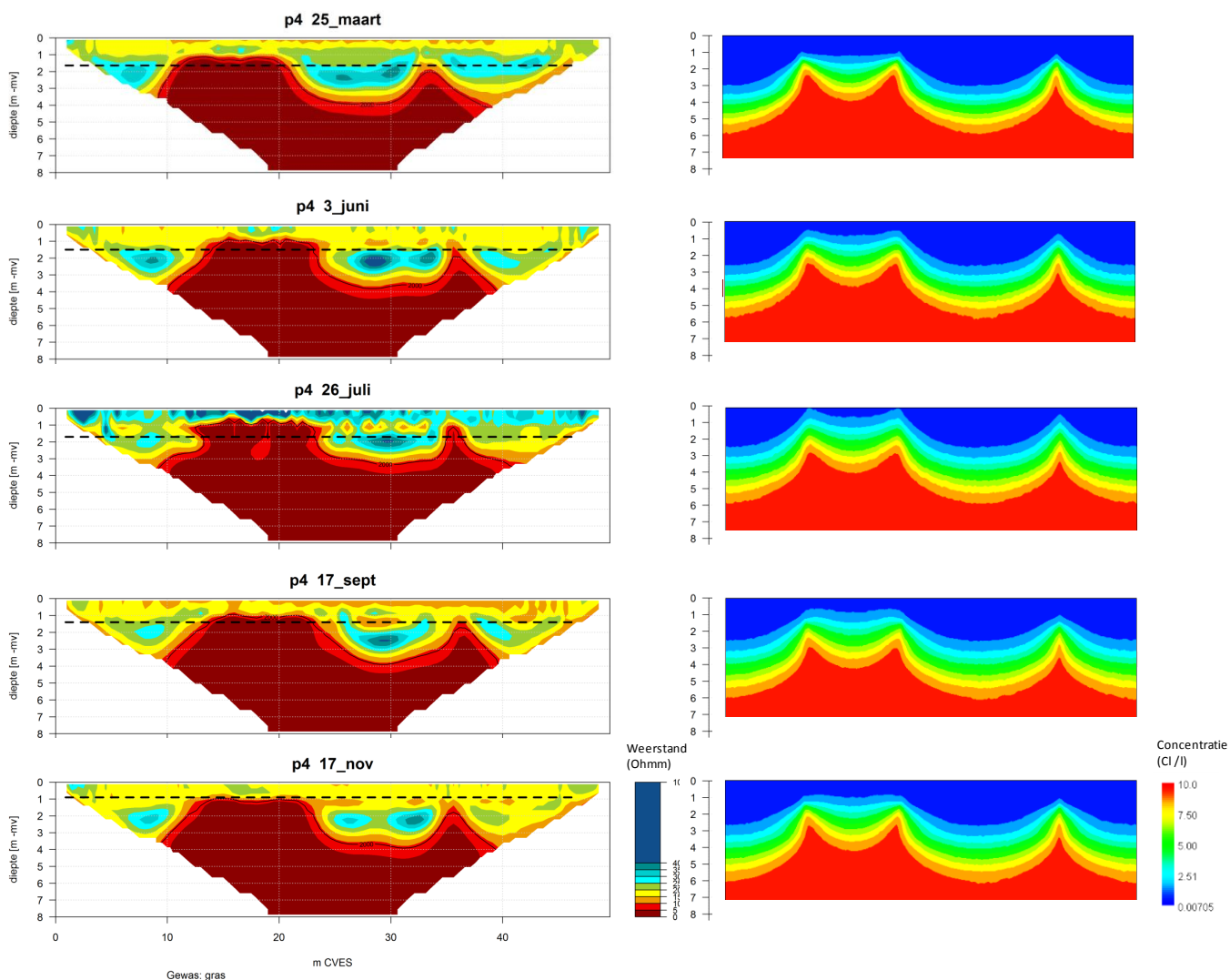
De eerste stap bij de ijking is het met het model kunnen voorspellen van de reeksen van gemeten grondwaterstanden. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 5.2. De algemene trend wordt door het model goed gesimuleerd. De mate van opbolling en dynamiek in de periode direct na een regenbui blijkt lastiger om helemaal te benaderen. De korte pieken in de metingen doen vermoeden dat er sprake is van een snelle afvoermogelijkheid. Dit duidt op de aanwezigheid van kleischeuren, die niet in het model kunnen worden geschematiseerd. De langzame component van de afvoer komt door de lage doorlatendheid van de klei. De lage doorlatendheid is dan weer verantwoordelijk voor de grotere opbolling die in de metingen wordt waargenomen. De optelsom van de twee vormt een gemiddelde geschematiseerde bergingscoëfficiënt en doorlatendheid in het model en verklaart de afwijking.



Figuur 5.2: Vergelijking grondwaterstandsmetingen en gesimuleerde grondwaterstanden voor perceel 4, Herbaijum.

De dynamiek van de zoet-zout verdeling en dikte van de neerslaglens voor de verschillende gemeten CVES profielen en de corresponderende simulatieresultaten zijn weergegeven in Figuur 5.3 .

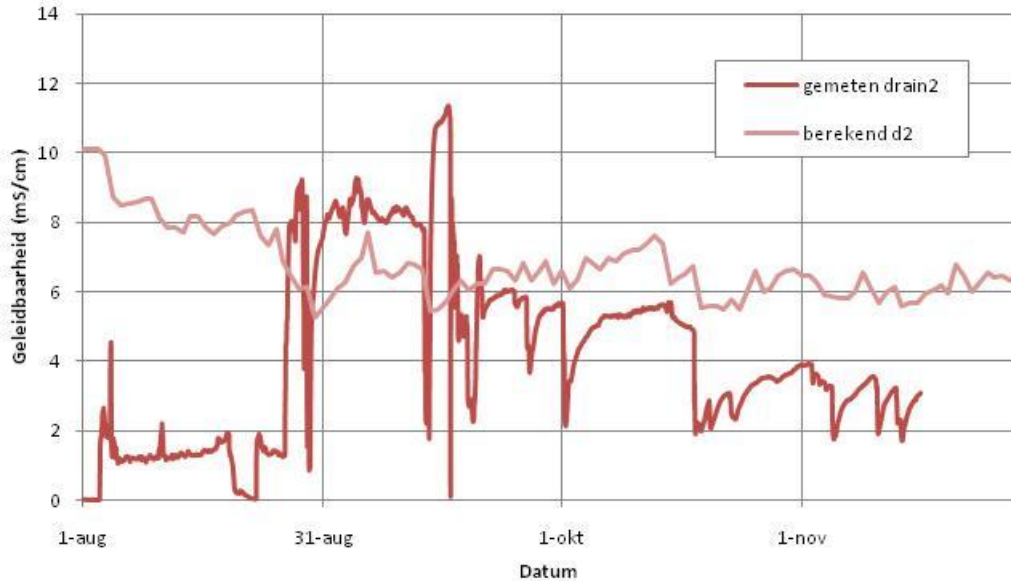
Het model is goed in staat het effect van drainage op de zoet-zoutverdeling te simuleren. Waar de drains dicht bij elkaar liggen is geen sprake van een zoetwaterlens en waar de drains verder uit elkaar liggen kan wel een lens ontstaan, overeenkomstig de metingen. De dikte van de neerslaglens (diepte van de 2000 mg/l contour) voor de beschouwde momentopnamen met de CVES komen ook goed overeen met de gesimuleerde dikte. Daarnaast is het model ook in staat om de verticale dynamiek te simuleren. Hoewel het een verzadigd grondwater model betreft simuleert het ook het zouttransport boven de grondwaterstand in de zomermaanden. Dit mag zeker niet één op één worden vertaald met de capillaire werking; een goede voorspelling van het transport van zout in het onverzadigd grondwater vereist een onverzadigde zone model.



Figuur 5.3: Vergelijking CVES metingen en gesimuleerde zoet-zout verdeling voor perceel 4, Herbaijum. Opgemerkt zij dat links de gemeten waarden in Ohmm (weerstand) zijn en rechts de gesimuleerde waarden in gram chloride per liter zijn weergegeven. De contourlijn in de weerstandsfiguren correspondeert met de 2000 mg/l contour.

De berekende en de in de drains gemeten watergeleidbaarheid (EC) is weergegeven in Figuur 5.4. De orde van grootte van de geleidbaarheid wordt goed gesimuleerd. Minder sterk is het model in staat de dynamiek te volgen die in werkelijkheid optreedt. Dit heeft wederom mogelijk te maken met de kleischeuren zoals hierboven is toegelicht. De kleischeuren zorgen voor een snelle afvoercomponent waardoor een neerslaggebeurtenis leidt tot een scherpe daling van de geleidbaarheid. Dit fenomeen kan in dit model niet worden geschematiseerd.

Begin augustus bevindt de grondwaterstand zich onder het niveau van de drains. Dit heeft zich in de geleidbaarheidsmetingen vertaald in een zeer lage waarde, omdat de drain droog staat.



Figuur 5.4: Vergelijking metingen geleidbaarheid draineffluent en gesimuleerde geleidbaarheid voor perceel 4, Herbaijum.

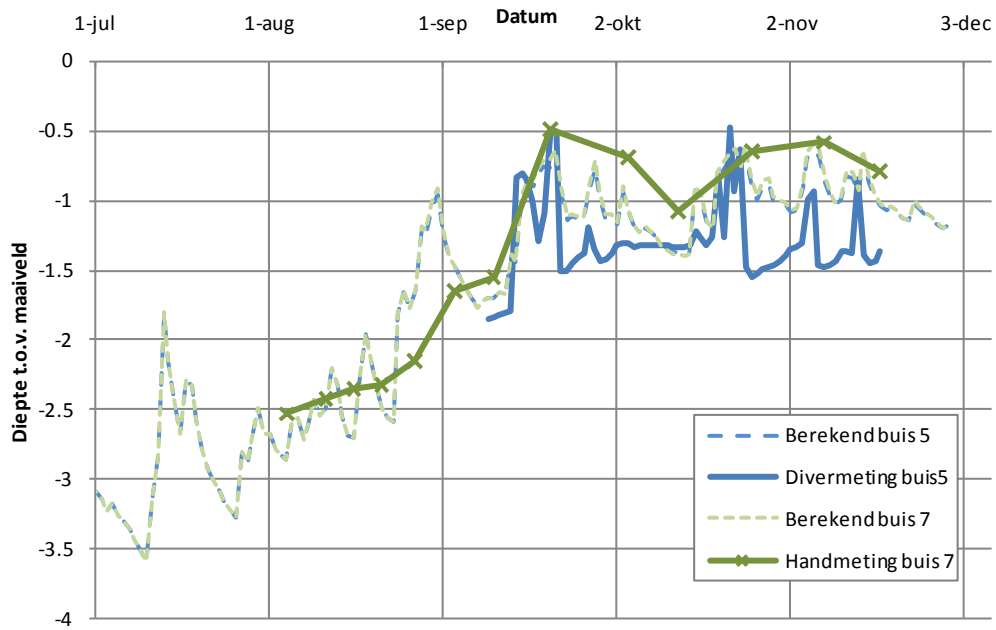
Model perceel 11 Rottum

De grondwateraanvulling is berekend met SWAP op basis van de informatie van het perceel. Dit perceel heeft een alternerend kwel en infiltratiekarakter. De kwelwaarde in MIPWA heeft een waarde van 0 mm/d (zie Tabel 3.2). In het model is in eerste instantie uitgegaan van een kwelsituatie waarbij een waarde van 0.4mm/d is aangehouden. De permeabiliteit van de zavelige bovengrond is middels een Hooghoudtproef bepaald op ca. 0.06m/d. Initieel is een wat hogere waarde aangenomen van 0.1 m/d. Uiteindelijk is na ijking een lagere waarde van 0.02m/d bepaald. Voor de overige parameters wordt verwezen naar tabel 5.2. De tabel toont ook de gewijzigde waarden na calibratie.

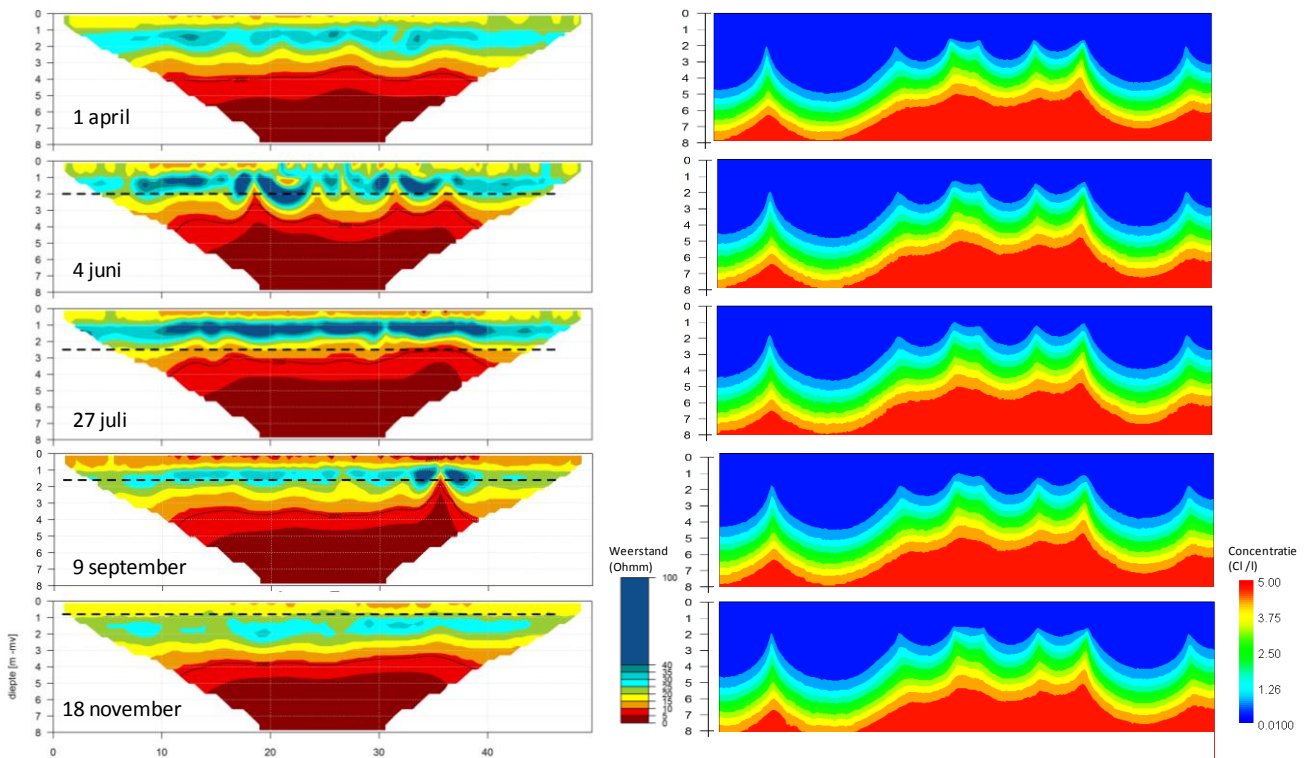
Tabel 5.2: parameters perceelsmodel Rottum (* K=doorlatendheid)

Parameter	Eenheid	Initieel	Na calibratie
Bovenlaag (zavel)			
Kx=Ky *	m/d	0.1	0.02
Anisotropie (Kx:Kz)	-	1:1	1:1
Bergingscoefficient	-	0.3	0.003
Weerstand drainagebuis	d	5	0.2 - 10
Dispersielengte	m	geen dispersie	0.35
Onderlaag (zand)			
Kx=Ky *	m/d	0.2	0.05
Anisotropie (Kx:Kz)	-	1:1	1:1
Bergingscoefficient	-	0.3	0.003
Dispersielengte	m	geen dispersie	0.35
Kwelflux	mm/d	0.4	0.05

De eerste stap bij de ijking is het met het model kunnen voorspellen van de reeksen van gemeten grondwaterstanden. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 5.5. De algemene trend wordt door het model goed gesimuleerd. De mate van dynamiek na een regenbui blijkt lastiger om helemaal te benaderen. De korte pieken in de metingen doen vermoeden dat er sprake is van een snelle afvoermogelijkheid. De snelle daling van de grondwaterstand is waargenomen in buis 5 die geplaatst is vlak naast een drain. Dit is de waarschijnlijke verklaring. Peilbuis 7 is ligt vrijwel in het midden tussen twee drains. Hoewel het om handmeting gaat is te zien dat de afname hier veel geleidelijker verloopt. Het grondwatermodel simuleert deze dynamiek naar behoren.



Figuur 5.5: Vergelijking grondwaterstandmetingen en gesimuleerde grondwaterstanden voor perceel 4, Rottum.

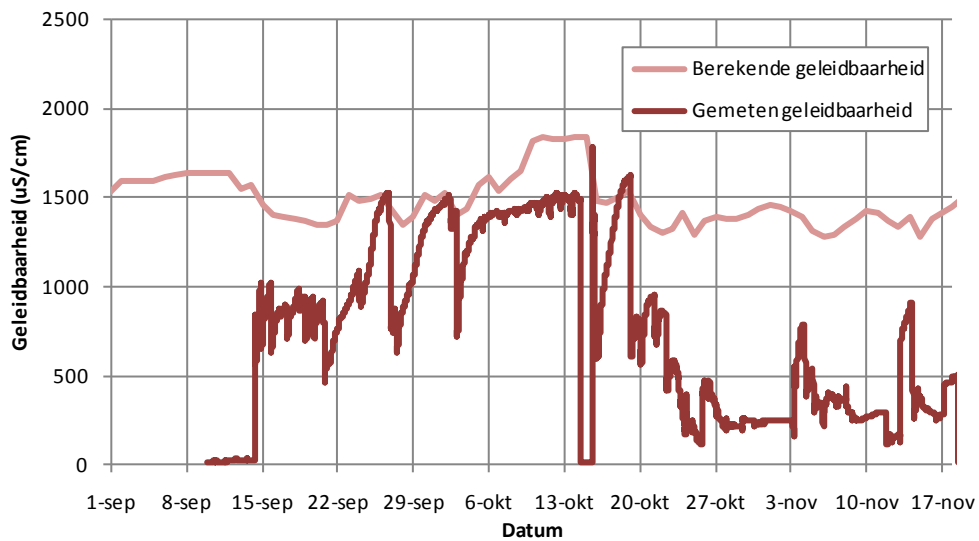


Figuur 5.6: Vergelijking CVES metingen en gesimuleerde zoet-zout verdeling voor perceel 4, Rottum. Opgemerkt zij dat links de gemeten waarden in Ohmm (weerstand) zijn en rechts de gesimuleerde waarden in gram chloride per liter zijn weergegeven. De contourlijn in de weerstandsfiguren correspondeert met de 2000 mg/l contour.

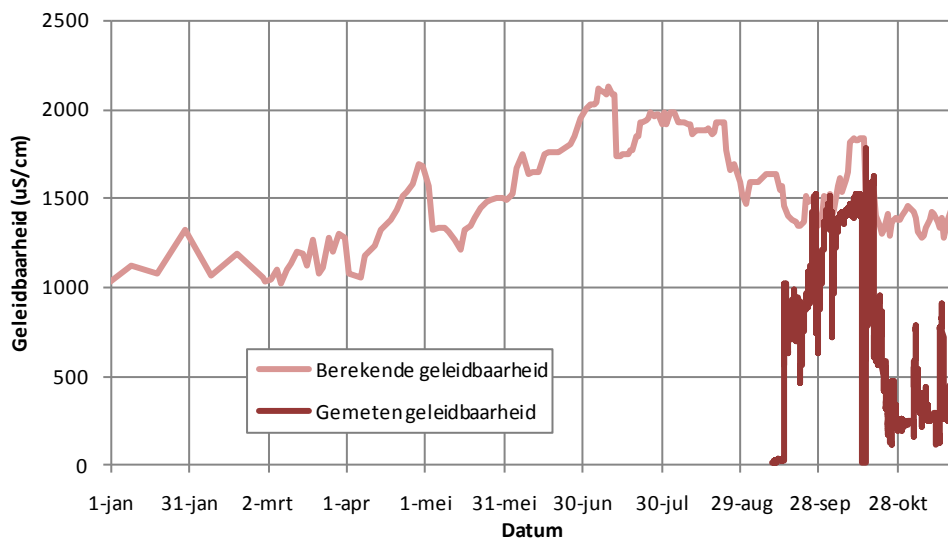
De dynamiek van de zoet-zout verdeling en dikte van de neerslaglens voor de verschillende gemeten CVES profielen en de corresponderende simulatieresultaten zijn weergegeven in

Figuur 5.6. Het systeem is complex door drainagebuizen van verschillende ouderdom, de mate waarin ze nog functioneren alsook de verschillende dieptes ervan.

De dikte van de neerslaglens voor de beschouwde momentopnamen met de CVES komen ook goed overeen met de gesimuleerde dikte (en diepte van het zoet-zout grensvlak). Een uitzondering vormt de droge periode van juli. Hier berekent het model een dikte die circa 25cm meer is dan uit de metingen naar voren komt. Hetgeen verklaard kan worden doordat in werkelijkheid een toename van kwel optreedt en in het model met een vaste onderrandvoorwaarde is gewerkt.



Figuur 5.7: Vergelijking metingen geleidbaarheid draineffluent en gesimuleerde geleidbaarheid voor perceel 11, Rottum.



Figuur 5.8: Vergelijking metingen geleidbaarheid draineffluent en gesimuleerde geleidbaarheid voor perceel 11, Rottum voor het hele jaar 2010.

De verticale dynamiek van het transport van zout grondwater onder de drainagebuizen blijkt moeilijk te simuleren. Het model berekent dat zout grondwater wordt opgetrokken naar de drainagebuizen. Echter het inzakken ervan na droogvallen van de buis wordt niet gesimuleerd.

Waar dit precies mee te maken heeft is nog onduidelijk. Het alternerende karakter van kwel en infiltratie in dit perceel versterkt de complexiteit ervan. In de zomermaanden (in dit geval met name eind juli) is in de metingen te zien dat het zoet-zout grensvlak ca. 0.5 m omhoog komt ten opzichte van de andere metingen. Dit duidt op een toename van de kweldruk, door een dalende grondwaterspiegel. In het model is gewerkt met een vaste flux als onderrandvoorwaarde. Een verbetering voor volgend onderzoek is om de kwelflux uit het diepe grondwater als een Cauchy-randvoorwaarde te modelleren, bestaande uit een vaste stijghoogte en een weerstand. Binnen het lopende project is ervoor gekozen dit niet meer aan te passen omdat het verwachte effect op de voorspellingen besproken in het volgende hoofdstuk klein is.

De voorspellende berekeningen van de basismodellen zullen hierdoor wat aan de conservatieve kant zitten. Wat wil zeggen dat, indien sprake is van een alternerende kwel en infiltratie, een minder groot risico (orde 25 cm) op het verdwijnen van de neerslaglens wordt berekend dan in werkelijkheid het geval is. De berekende en gemeten watergeleidbaarheid (EC) is weergegeven in Figuur 5.7. De orde grootte van de geleidbaarheid wordt goed gesimuleerd. Minder sterk is het model in staat de dynamiek te volgen die in werkelijkheid optreedt. Een relatie met kleischeuren valt hier niet uit te sluiten maar is vooralsnog niet uit de metingen af te leiden. Een andere mogelijkheid is dat het met de eerder genoemde verticale dynamiek te maken heeft die in werkelijkheid sterker is dan wat het model simuleert. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 5.8. Uit de figuur blijkt dat het model moeite heeft een lage geleidbaarheid voor het draineffluent te berekenen. Dit komt doordat in het model de zoute pluim onder de drain blijft bestaan en ook in natte perioden niet verdwijnt. De hoge waarden, relevant voor de droge perioden, worden wel goed benaderd.

5.3.3 Gevoeligheid modeluitkomsten

Bij het calibreren van de twee modellen van de percelen Rottum en Herbaijum is de gevoeligheid van de parameters op de berekende grondwaterstand, dikte neerslaglens en geleidbaarheid van het draineffluent onderzocht. Voor het vaststellen van de verziltingsrisicokaart is met name de gevoeligheid voor de berekende dikte van de neerslaglens van belang. In de voorgaande paragraaf is steeds een tabel opgenomen van de parameters die zijn gevarieerd.

De doorlatendheid is van invloed op de dikte van de neerslaglens. Dit blijkt uit de berekeningen waarbij is gevarieerd met deze waarden. Het is echter zo dat voor de percelen de doorlatendheid in het veld is bepaald. De mogelijkheid om bij de calibratie veel af te wijken van deze waarde is hierdoor beperkt.

De dikte van de neerslaglens wordt beïnvloed voor de mate van anisotropie. Het blijkt in de simulaties vooral van invloed op de breedte van de overgangszone tussen zoet en zout. Op de dikte zelf is het beperkt van invloed. In de literatuur (o.a. De Vries, 1974) worden waarden tot 1:10 aangehouden. Om hierin te voorzien is in de berekeningen voor de verziltingsrisicokaart anisotropie ingebracht.

De bergingscoëfficiënt is een parameter die vooral invloed heeft op de dynamiek van het systeem. De toe te passen bandbreedte wordt in sterke mate beperkt door de dynamiek van de grondwaterstand. Als ten dele afgeleide volgt hieruit de dynamiek van de chlorideconcentratie in het draineffluent.

Het model is zo geschematiseerd dat de buisdrainage vrijwel expliciet is opgenomen. Dat wil zeggen dat een buis met een diameter van 6 cm is ingebracht in een rekencel van 10cmx10cm. De weerstand van de buisdrainage wordt daarom vrijwel in zijn geheel bepaald door de intreeweerstand. Uit de literatuur (o.a. Velstra, 2010) is een relatie gegeven van de intreeweerstand en buisdiameter. Voor de buizen die hier in Nederland gebruikelijk zijn geldt dat de intreeweerstand zeer klein is. De toe te passen bandbreedte van de drainageweerstand van de buisdrainage wordt daarnaast beperkt door de invloed die het heeft op de berekende hoogte van de grondwaterstand. Op basis van de modelsimulaties worden dan ook waarden van 0.2 dagen als best fittend gevonden (voor beide continupercelen).

Bij de calibratie is gebleken dat kwel een bepalende factor is in de berekende dikte van de neerslaglens. Dit komt doordat in het gebied van Friesland en Groningen sprake is van lage kwelfluxen (orde enkele tienden van mm/d). Dit blijkt te meer uit de metingen van perceel Rottum waar sprake is van een alternerende kwel en infiltratiesituatie. Een dalende grondwaterstand leidt hier tot het optreden van kwel waardoor direct het zoet-zoutgrensvlak omhoog komt. Dit fenomeen is niet in het model gesimuleerd doordat gewerkt is met een vast flux als onderrandvoorwaarde.

Bepalend voor de berekende dikte van de neerslaglens is de doorlatendheid van de bodem en de optredende kwelflux. De onzekerheid van de doorlatendheid is beperkt doordat deze in de percelen is gemeten. Voor wat betreft de kwelflux is het zo dat het model het effect van de optredende of toename van de kwel in meer of mindere mate onderschat bij lage grondwaterstanden.

5.3.4 Conclusies calibratie en gevoeligheidsanalyse

Het op deze schaal, met de kleinste celgrootte van 10cm de schaal van de draindiameter, simuleren van grondwaterstroming en stoftransport is complex. De calibratie betreft grondwaterstanden, dikte van de neerslaglens, verdeling van zoet en zout in de ondergrond en tenslotte de chlorideconcentratie van het draineffluent.

Door op deze schaal het drainagesysteem van een perceel te simuleren voldoet het model voor het berekenen van de dikte van de neerslaglens en de dynamiek ervan. De nauwkeurigheid van de berekende dikte is circa 25cm.

De algemene trend van de grondwaterstand wordt door het model goed gesimuleerd. De mate van opbolling en dynamiek na een regenbui blijkt lastiger om goed te benaderen. De korte piek in de metingen doen vermoeden dat er, naast een langzame afvoermogelijkheid, sprake is van een snelle afvoermogelijkheid. Vermoedelijk houdt dit verband met het voorkomen van kleischeuren. De huidige modelschematisatie en modelcode staan het verdisconteren van deze kleischeuren nog niet toe.

De ordegrootte van de geleidbaarheid in het draineffluent wordt goed gesimuleerd. Minder sterk is het model in staat de dynamiek te volgen die in werkelijkheid optreedt. Er zijn twee mogelijke verklaringen geïdentificeerd. De eerste betreft de aanwezigheid van kleischeuren. Hierdoor kan regenwater sneller worden afgevoerd, stijgt het aandeel regenwater in het draineffluent en is een scherpe daling van de geleidbaarheid het gevolg.

Een tweede mogelijke verklaring is de verticale dynamiek van onder de drain optrekkende en inzakkende zout pluim. Deze dynamiek is in werkelijkheid sterker dan wat het model simuleert.

Het model heeft hierdoor moeite een sterke verlaging van de geleidbaarheid voor het draineffluent te berekenen. Dit komt doordat in het model de zoute pluim onder de drain blijft bestaan en ook in natte perioden niet verdwijnt. De hoge waarden, relevant voor de droge perioden, worden wel goed benaderd.

Een beperking van het model is dat het uitsluitend verzadigde grondwaterstroming en stoftransport berekend. Bij de interpretatie van de metingen als ook het toepassen van de modellen is duidelijk geworden dat het gehele systeem van verzadigde en onverzadigde zone integraal gesimuleerd dient te worden.

Er is gerekend met een verzadigd grondwater model. Dit model simuleert ook het zouttransport boven de grondwaterstand. Dit vertaalt zich in de droge zomermaanden in verticaal transport van zout boven de grondwaterstand. Deze resultaten mogen zeker niet één op één worden vertaald met de capillaire werking, een goede voorspelling vereist een onverzadigde zone model.

5.4 Parametrisatie onderzoeksgebied Noord-Nederland

Uit de vorige paragraaf volgt dat de perceelsmodellen de dynamiek van de zoetwaterlenzen kunnen voorspellen met inachtneming van de genoemde beperkingen.

De volgende stap is om het onderzoeksgebied te parametriseren om de modellendatabase te kunnen opzetten. Hiervoor verdelen we het gebied onder in verschillende combinaties van modelparameters, waarvan de variatie binnen het gebied zo goed als mogelijk bekend is. De parameters waarlangs we de ruimte parametriseren zijn de kwel, de bodembouw en de k-waarde.

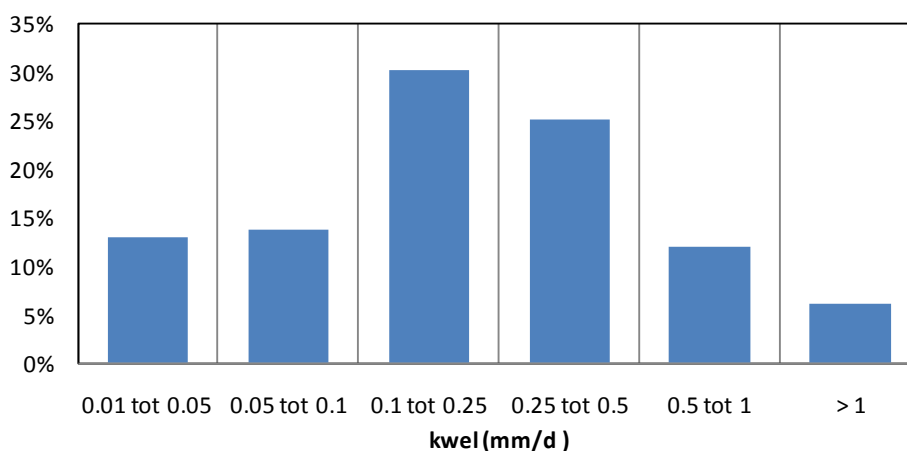
5.4.1 Inperking onderzoeksgebied

Uit de metingen en de berekeningen blijkt dat er al zout of brak grondwater nabij het oppervlak moet liggen om een risico op verzilting te krijgen. Om deze reden wordt het onderzoeksgebied ingeperkt tot die locaties waar het 5 Ohmm grensvlak op minder dan 5 meter onder maaiveld ligt. De 5 Ohmm is een weerstandswaarde die grofweg correspondeert met het 2000 mg/l grensvlak van het chloridegehalte.

5.4.2 Kwel

In hoofdstuk drie is de beschikbare kwelkaart besproken. Uit deze kwelkaart is af te leiden dat de bandbreedte van kwelwaarden in het gebied varieert van 0 tot in enkele gevallen meer dan 1 mm/dag. Figuur 5.9 toont de verdeling van de kwel binnen het ingeperkte onderzoeksgebied volgens de uitkomsten van het MIPWA-model.

Om te gebruiken voor de parametrisatie is de range van kwelwaarden geïnclassificeerd tot 6 klassen. Dit zijn 0.01 mm/d, 0.05 mm/d, 0.1 mm/d, 0.25 mm/d, 0.5 mm/d en 1 mm/d.



Figuur 5.9: verdeling van kwelintensiteit in gebieden met ondiep zout

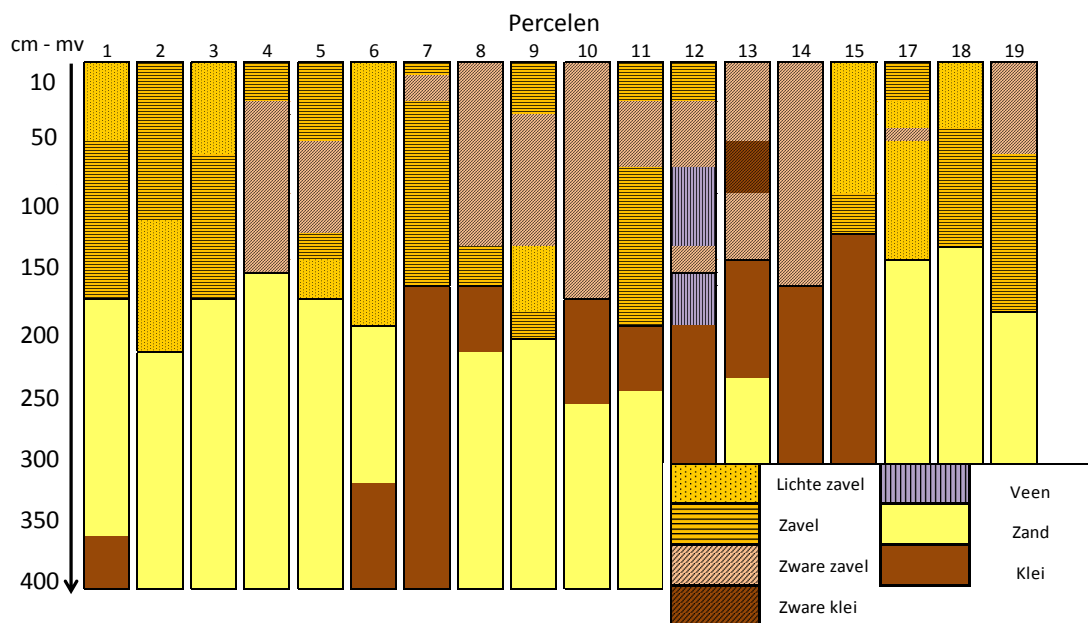
5.4.3 Bodemopbouw

In paragraaf 3.3 is geanalyseerd welke type bodems voorkomen binnen het onderzoeksgebied. Tijdens het veldonderzoek is van ieder perceel een boring en bodembeschrijving gemaakt tot een diepte van ~2m. Figuur 5.10 toont een overzicht van de boorbeschrijvingen.

In de figuur is tot aan de zwarte streep de boorbeschrijving van de veldonderzoeker te zien. De indelingen in type bodem is gebaseerd op het lutumgehalte van de bodem zoals weergegeven in Tabel 3.1 in paragraaf 3.3.3.

Het onderste deel van de profielen is afgeleid uit de boorbeschrijving van de dichtstbijzijnde boring uit DINO. De indeling van de boorbeschrijving in DINO is aangehouden en is dus grover (alleen zand, klei of veen).

Uit de figuur blijkt dat de bodemopbouw in het beschouwde gebied ofwel een dunne kleiachtige deklaag (lichte zavel, grove zavels) die grofzandiger wordt met de diepte ofwel een dikke kleiige deklaag. Dit is consistent met het beeld dat Figuur 3.3 laat zien. Het eerste type bodemopbouw ziet men vooral in gebieden langs de kust en in gebieden die recenter zijn gesedimenteerd. Het profiel met de dikke deklaag ziet men meer in de meer landinwaarts gelegen zwaardere gronden en in het Oldambt.



Figuur 5.10: verticaal bodemprofiel van de veldonderzoekpercelen tot aan de zwarte streep. Onder de zwarte streep is de boorbeschrijving van de dichtstbijzijnde DINO-boring

De figuur toont een verscheidenheid aan bodemopbouw. De matig doorlatende laag aan de bovenkant verschilt per perceel wat betreft zwaarte van de bodem, maar ook wat betreft dikte. De meeste percelen hebben een deklaag tussen de 1.50 en 3 meter dik. Vanwege het mogelijke effect dat de dikte van de deklaag op de dynamiek van de zoetwaterlenzen heeft is gekozen om een modellendatabank te vullen voor de situatie met 2 en 3 meter dikke deklaag.

5.4.4 Doorlatendheid

De doorlatendheid van de ondergrond is een parameter die zich niet makkelijk laat afleiden of meten. De heterogeniteit van de bodems en de diversiteit in bodemsoorten maakt het moeilijk om deze te kwantificeren. Wat wel mogelijk is, is om de orde van

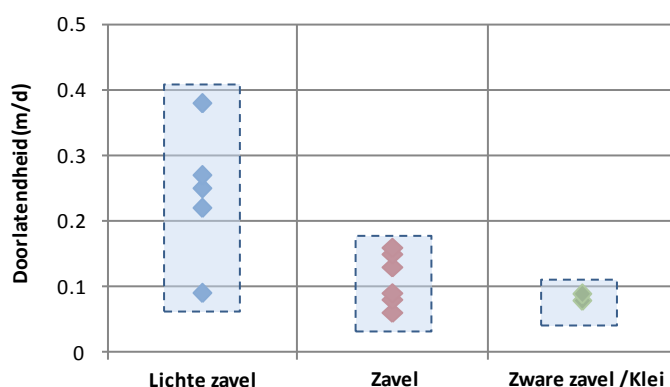
grootte van de doorlatendheden vast te stellen en met een aantal voor het onderzoeksgebied representatieve k-waarden te rekenen.

Uit literatuur (o.a. Massop 2005) blijkt dat de doorlatendheden van zavelachtige gronden divers zijn. Verschillende studies noemen waarden uiteenlopend van 0.001 (klei) tot 0.5 m/d (lichte zavel).

Om een beeld te krijgen van de verscheidenheid aan doorlatendheden in Noord-Nederland is op elk veldwerkperceel een Hooghoudt-doorlatendheidproef uitgevoerd. Op 13 van de 18 percelen is een doorlatendheidproef uitgevoerd. Tabel 5.3 toont het resultaat van de metingen.

Tabel 5.3: resultaten doorlatendheidsmetingen veldonderzoekpercelen

Perceel	diepte boorgat (cm - mv)	hoogte waterkolom in boorgat (cm)	bodem	k-waarde (m/d)
1	210	57	zavel	0.08
2	240	87	lichte zavel	0.22
3	230	84	zavel	0.09
4	290	130	lichte zavel	0.15
5	285	151	lichte zavel	0.25
6	195	91	lichte zavel	0.27
7	170	20	-	-
8	130	18	-	-
9	235	75	lichte zavel	0.09
10	216	25	zware zavel/klei	0.08
11	220	30	zavel	0.06
12	144	12	-	-
13	185	70	zware zavel/klei	0.09
14	125	14	-	-
15	154	49	lichte zavel/zandig	0.38
17	185	55	-	-
18	162	45	zavel	0.13
19	195	48	zavel	0.16



Figuur 5.11: resultaten doorlatendheidsmetingen geassocieerd naar bodemtype

Uit de tabel blijkt dat de gemeten k-waarden variëren tussen de 0.06 m/d en 0.38 m/d. Met name in zware kleigronden bleek het lastig om een goede Hooghoudtproef uit te voeren. Uit de tabel blijkt dat de k-waarde oploopt met afnemende zwaarte van de bodem. Dit is goed te zien in Figuur 5.11, die een overzicht toont van de metingen geassocieerd naar bodemtype. Uit de metingen blijkt dat ook binnen de gekozen classificatie significante verschillen in doorlatendheid zijn bijvoorbeeld als gevolg van heterogeniteiten.

Het is dus niet precies vast te stellen welke k-waarden overeenkomen met de verscheidenheid aan bodems in Noord-Nederland. Om deze reden moeten we ons in deze studie beperken tot een aantal aannames. Deze zijn:

- De doorlatendheid van de bodem neemt af met toenemende zwaarte van de bodem.
- Uit literatuurwaarden (en de veldproeven) blijkt dat de doorlatendheden in zavelige gronden variëren van 0.001 tot maximaal 0.5 m/d.

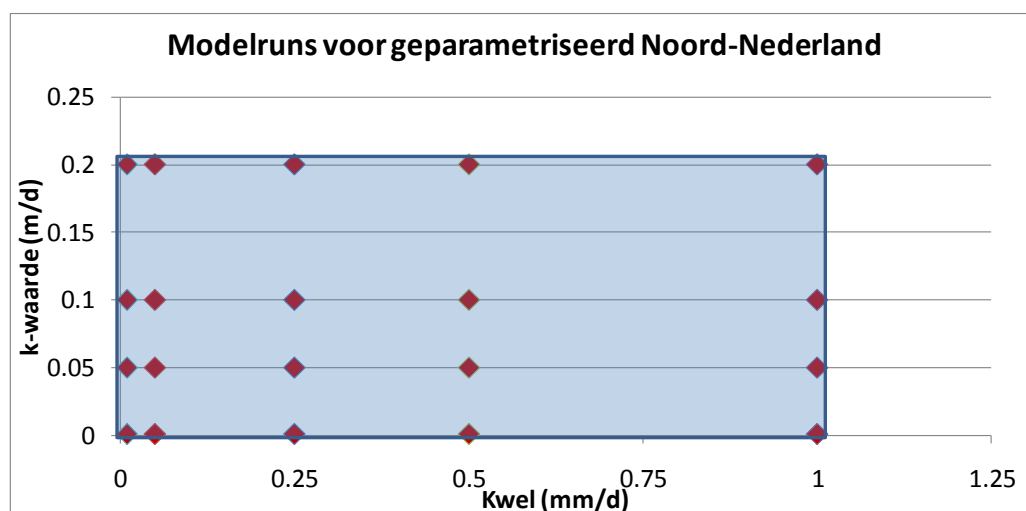
Voor de parametrisatie zijn de volgende waarden (Tabel 5.4) aangenomen die als representatief worden beschouwd zijn voor de bodems in het studiegebied.

Tabel 5.4: Aannames voor type bodem en k-waarden

Bodem	K-waarde (m/d)
Lichte zavel (max)	0.40
Zavel tot lichte zavel	0.20
Zware zavel tot zavel	0.10
Klei tot zware zavel	0.05

5.4.5 Modelruimte

Gezamenlijk bespannen de parameters kwel en doorlatendheid een ruimte weergegeven in Figuur 5.12. In totaal vormen alle combinaties van kwel, doorlatendheid en bodemopbouw een totaal van 48 modelruns.



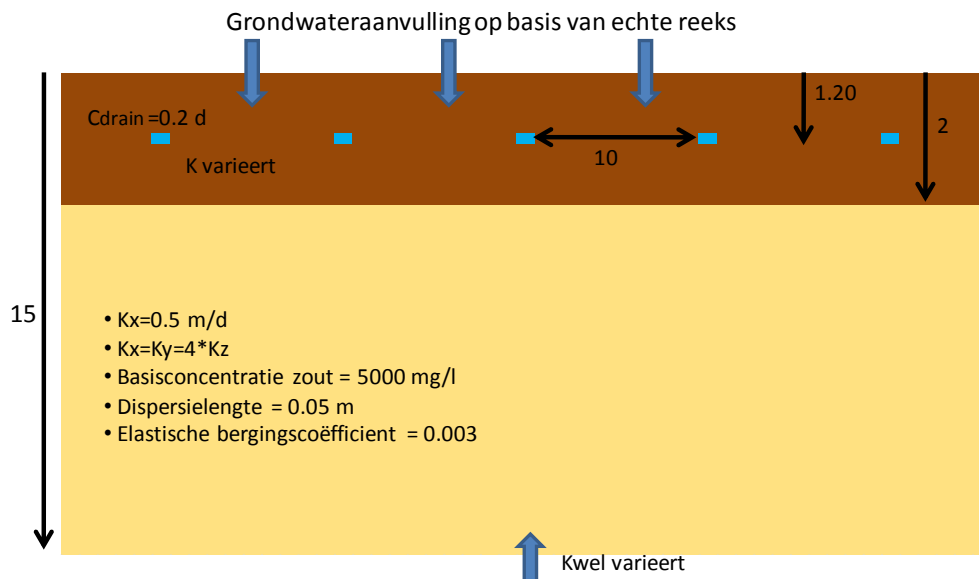
Figuur 5.12: aangenomen variatie in kwel en doorlatendheid toplaag voor de modelruns. De kleinste kwelwaarden zijn ten behoeve van de duidelijkheid niet als punt getoond.

5.5 Basismodellen & modellendatabank

Naast de kwel en de doorlatendheid van de bodem is er nog een groot aantal andere parameters dat invloed heeft op de hydrologie in een perceel. Deze worden in de modellen constant gehouden. De reden hiervoor kan zijn:

- De parameter heeft weinig invloed op de dynamiek van de zoetwaterlens;
- De variatie van de parameter binnen het gebied is zo klein dat een enkele waarde representatief wordt geacht;
- De waarde is goed bekend, zodat de a-priori onzekerheid klein is en variatie niet noodzakelijk is.

Figuur 5.13 toont het conceptuele model dat ten grondslag ligt aan de scenario-berekeningen. In de figuur staan de waarden van de verschillende parameters van het perceelsmodel. Binnen dit model wordt steeds de kwel en de doorlatendheid van de toplaag gevarieerd zodat een databank van resultaten wordt opgebouwd.



Figuur 5.13: conceptueel model perceel Noord-Nederland met relevante parameters

De figuur toont de geschematiseerde bodemopbouw van de in het studiegebied veel voorkomende sequentie van een matig doorlatende deklaag die naar de diepte toe steeds grover wordt (zie paragraaf 3.3.3).

Het basismodel heeft de volgende uitgangspunten:

- Het model heeft 40 lagen en 597 cellen.
- Er is geen sprake van stroming over de zijkanten van het model. Dit betekent dat de invloed van de sloten op het vormen van de lens als verwaarloosbaar wordt beschouwd. De dynamiek van het systeem vindt met name in de verticaal plaats. Gezien de over het algemeen grote slootafstanden (zie paragraaf 3.2) in de kuststrook geldt dit voor het grootste deel van de landbouwpercelen.
- De kwel is constant gedurende het jaar;
- Er wordt anisotropie aangenomen. $K_x/K_z = 1:4$;
- De vijf drains liggen op 1.20 onder maaiveld en 10 meter van elkaar. Dit zijn de meest voorkomende draindieptes en -afstanden in het onderzoeksgebied (zie paragraaf 3.3.2).
- De concentratie van zout grondwater onderin het model is 5000 mg/l. Dit is een redelijke waarde in een milieu met wadachtige afzettingen. Hogere en lagere waarden komen ook voor.
- De waarden voor de dispersie, doorlatendheid van de diepe laag, bergingscoëfficiënt en weerstand van de drain zijn ontleend aan de (conclusies) van de calibraties van de continupercelen.
- De berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode van 1993 tot en met 2005. In ieder geval de eerste zeven jaar zijn zogenaamde "inslingertijd", waarin het model stabiel wordt. Hier wordt een tijdstap van 30 dagen gebruikt. De tijdreeks bevat in ieder geval het "droge" jaar 2003 en het "gemiddelde" jaar 2005. De tijdstapgrootte voor de scenario-berekeningen is 1 dag.
- De grondwateraanvulling is berekend met SWAP met gras als landgebruik. Als basis dient de neerslagreeks 1993-2005 van neerslagstation Middelstum en de referentieverdampingsreeks van KNMI-station Eelde van dezelfde periode.

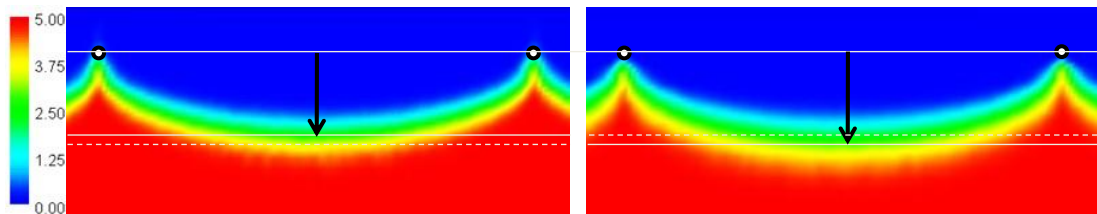
5.6 Resultaten berekeningen

In totaal zijn 48 modelruns doorgerekend. De uitvoerparameters zijn:

- de minimale zoetwaterlensdikte per tijdstap
- de stijghoogte op en midden tussen de drains per tijdstap
- het chloridegehalte in de drain per tijdstap

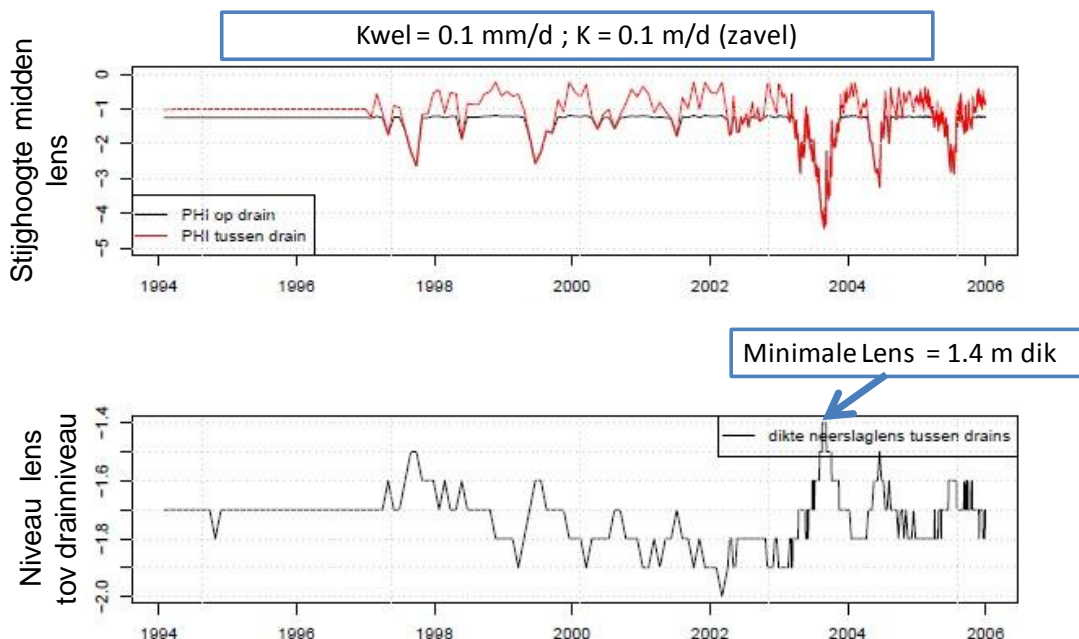
Hierbij geldt dat de dikte van de zoetwaterlens gedefinieerd is als de verticale afstand van het 2000 mg/l grensvlak tot de diepte van de drain. Figuur 5.14 toont een voorbeeld van een resultaat van een modelrun en welke afstand de diepte van de lens definieert.

De linkerfiguur toont een weergave van de chlorideverdeling in het perceel in een droge periode, de rechterfiguur toont een natte periode, waarin de zoetwaterlens iets groter is. De stippellijnen tonen de hoogte van de zoetwaterlens uit de andere figuur, zodat een vergelijk mogelijk is. In deze modelrun is gerekend met een bovenlaag van 2 meter, een kwelintensiteit van 0.1 mm/d en een k-waarde van de bovenlaag van 0.1 m/d.



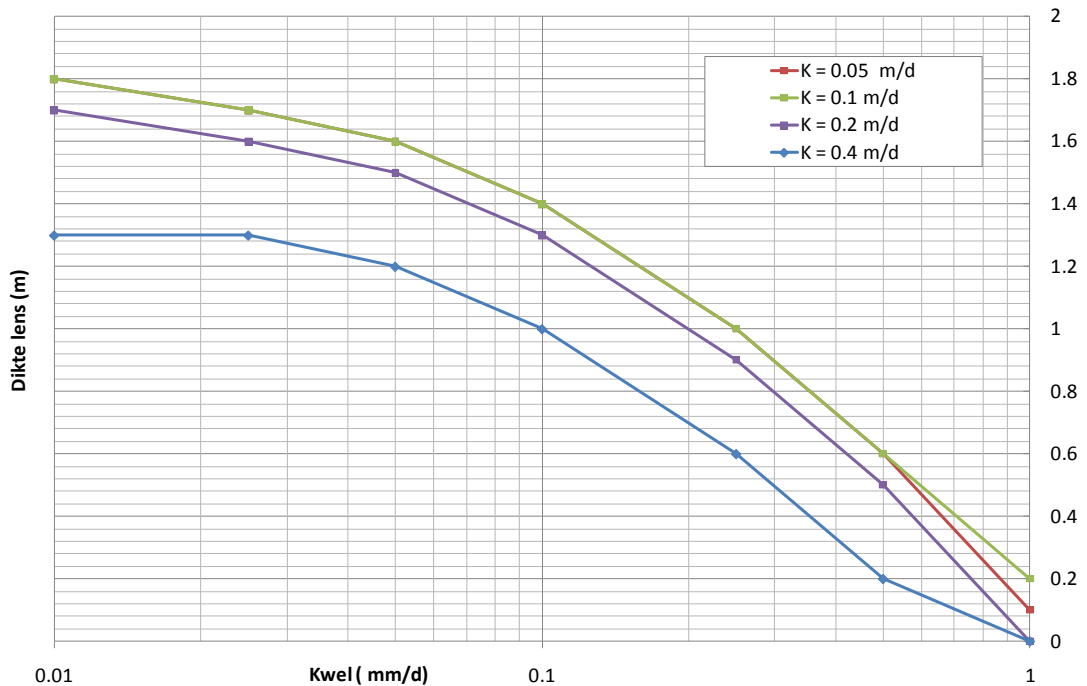
Figuur 5.14: visuele weergave van het met een perceelsmodel berekende chloridegehalte voor twee tijdstappen in een droge (links) en een natte periode (rechts). De kwel is 0.1 mm/d, de k-waarde toplaag is 0.1 m/d

Van de modeloutput zijn automatisch grafieken gemaakt die het verloop van bovenstaande uitvoerparameters in de tijd laten zien. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 5.15.

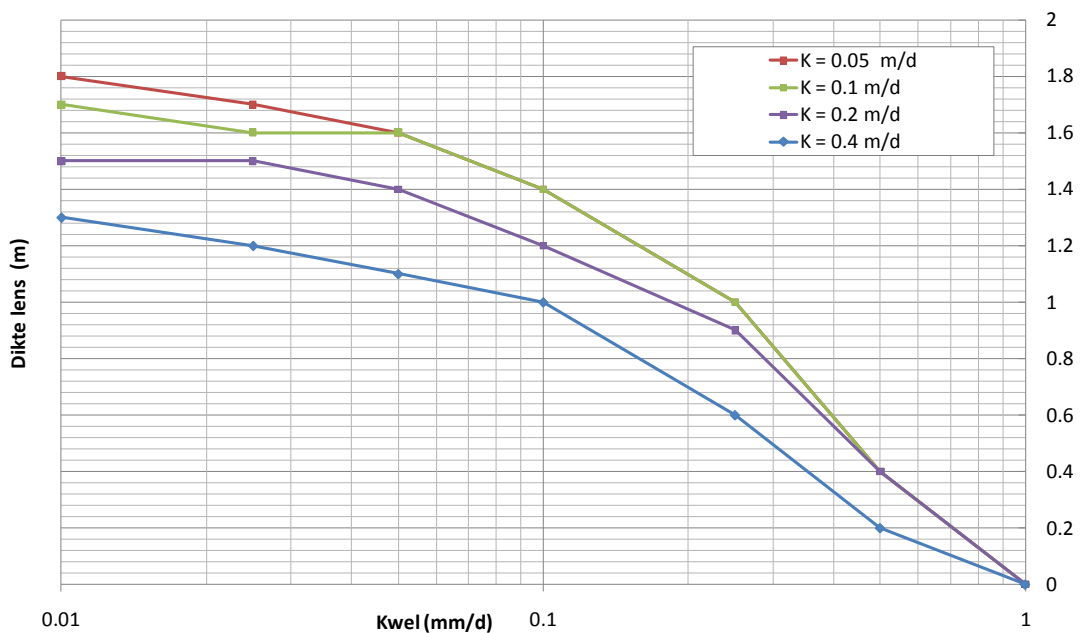


Figuur 5.15: voorbeeld van een automatisch gegenereerde grafiek, voor de situatie kwel = 0.1 mm/d, doorlatendheid = 0.1 m/d, dikte deklaag = 2 meter.

Deze grafiek toont het verloop van de stijghoogte tussen de drains en de afstand van de onderkant van de zoetwaterlens tot het drainniveau in de tijd. Duidelijk zichtbaar is de ver wegzakkende grondwaterstand in de zomer van 2003. De minimale lensdikte correspondeert met de verst wegzakkende grondwaterstand. In dit specifieke geval krimpt de berekende zoetwaterlens tot minimaal 1.4 meter. Uit de figuur blijkt dat bij een lage kwelintensiteit de dynamiek van de zoetwaterlens beperkt is. De maximale berekende lensdikte is 2 meter in het voorjaar van 2002.



Figuur 5.16: modelresultaten minimale dikte zoetwaterlens bij een deklaag van 2 meter



Figuur 5.17: modelresultaten minimale dikte zoetwaterlens bij een deklaag van 3 meter

Uit de resultaten van elke modelrun wordt de berekende minimale lensdikte uit de periode van 1994 tot 2006 geëxtraheerd. De minimale lensdikte van alle modellen worden vervolgens geplot in een figuur waarin de dikte van de lens uitgezet is tegen de kwel voor verschillende curves. Elke curve correspondeert met een verschillende k-waarde van de deklaag.

Figuur 5.16 en Figuur 5.17 tonen curven met een respectievelijke dikte van de toplaag van 2 meter en 3 meter.

Uit deze grafieken kunnen we een aantal resultaten afleiden:

- in beide grafieken verdwijnt onder bepaalde omstandigheden de berekende zoetwaterlens (bereikt een dikte van 0 meter). Overigens gebeurt dit in alle berekeningen in de (na)zomer van het jaar 2003, dat het droogste jaar is binnen de beschouwde tijdreeks.
- Uit de grafieken blijkt dat een beter doorlatende deklaag leidt tot een dunnere zoetwaterlens. Dit is verklaarbaar vanuit het feit dat de drains in een goed doorlatende bodem sneller water af kunnen voeren. Een regendruppel die tussen de drains valt, dringt minder de diepte in omdat deze sneller naar de drain wordt getransporteerd. Er bouwt zich minder druk op tussen de drains waardoor de zoetwaterlens minder dik is.
- Uit Figuur 5.17 blijkt dat bij een deklaag van 3 meter nagenoeg dezelfde minimale lensdikte per combinatie van kwel en k-waarde wordt berekend als in het geval van de 2 meter dikke deklaag in Figuur 5.16. Er zijn ook verschillen; er vormt zich een iets minder dikke lens bij een dikkere deklaag. De verschillen zijn echter in de orde van maximaal twee decimeter. Dit valt binnen de numerieke onzekerheid. (zie paragraaf 5.3.4).
- De intensiteit van de regionale kwel bepaalt het meest de verscheidenheid in zoetwaterlensdikte in Noord-Nederland. Bij een voortdurende kwelintensiteit van 1 mm of meer verdwijnt de berekende zoetwaterlens in een droog jaar als 2003. Bij een kwelflux kleiner dan 0.1 mm per dag blijft de berekende lensdikte in alle gevallen dikker dan een meter.

6 VERZILTINGSRISICOKAART

6.1 Criteria

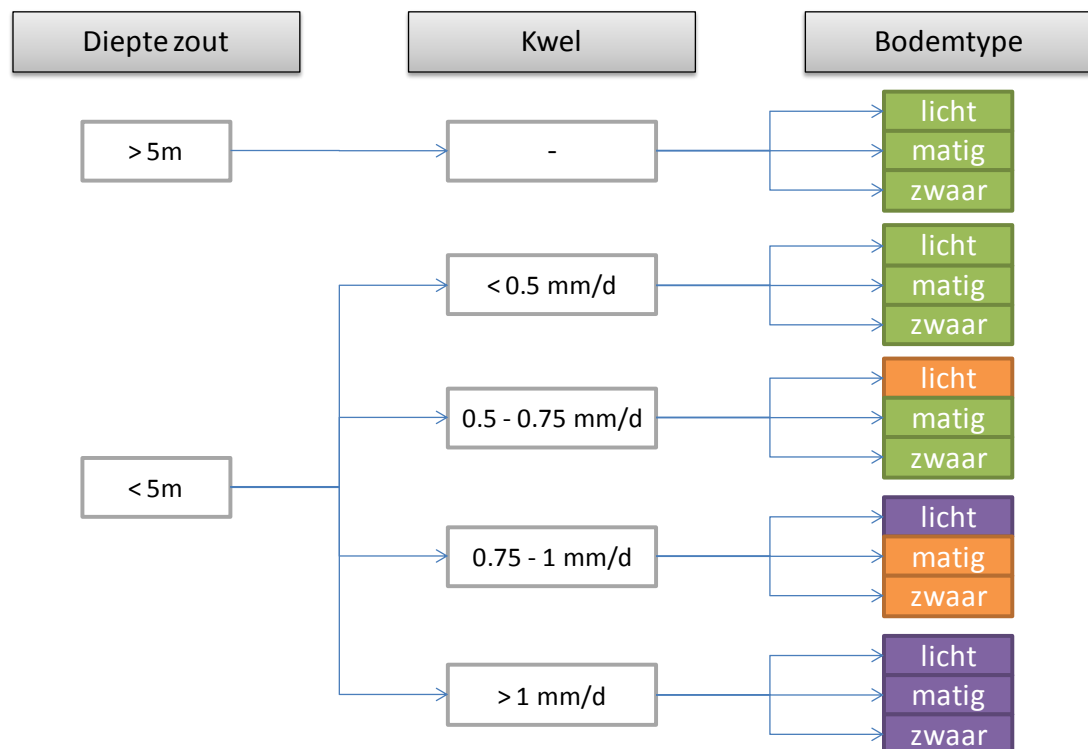
Uit de vorige paragraaf blijkt dat de in de zoetwaterlens modelmatig kan verdwijnen. Een relatie is opgesteld tussen de minimale dikte van de zoetwaterlens, de k-waarde van de deklaag en de regionale kwelintensiteit. In deze paragraaf worden de resultaten van de voorgaande drie hoofdstukken gecombineerd tot een gebiedsdekkende verziltingsrisicokaart.

In paragraaf 5.1 is een keuze gemaakt over wat verziltingsrisico is binnen de kaders van dit rapport. We spreken over verziltingsrisico

"als op enig moment in de tijd de zoetwaterlens onder een perceel in zijn geheel verdwijnt".

De modelberekeningen tonen wanneer onder bepaalde omstandigheden de zoetwaterlens verdwijnt. Vanwege onzekerheden in invoerparameters, modelconcept en numerieke onnauwkeurigheden heeft het resultaat een bandbreedte. De grootte van deze bandbreedte is niet precies bekend, maar deze is geschat op minimaal 0.25 m (zie paragraaf 5.3.4).

Vanwege deze bandbreedte wordt het resultaat opgedeeld in klassen. Dit leidt tot een overzichtelijke kaart, die laat zien welke gebieden risico lopen en welke niet, zonder een schijnnaauwkeurigheid te creëren.



Figuur 6.1: beslidiagram voor het bepalen of een combinatie van zoutdiepte, kwel en zwaarte van de bodem leidt tot geen (groen), matig(oranje) of groot (paars) risico leidt

Er worden drie risicoklassen onderscheiden. Deze zijn:

- Geen risico. Als de berekende zoetwaterlens bij een zekere combinatie van parameters nooit dunner wordt dan 0.5 meter, dan wordt gesteld dat er geen risico is op het verdwijnen van de zoetwaterlens.

- Risico. Als de berekende zoetwaterlens tussen de 0.25 en 0 meter komt dan wordt gesproken van een risico van verdwijnen
- Groot risico. Als uit de modelresultaten blijkt dat de zoetwaterlens geheel verdwijnt bij een zekere combinatie van parameters dan wordt gesteld dat er een groot risico is voor het verdwijnen van de zoetwaterlens.

Door het combineren van deze aannames met de berekende modelresultaten weergegeven in Figuur 5.16 en Figuur 5.17, ontstaat het beslisdigram weergegeven in Figuur 6.1.

Eerst wordt op elke locatie in Noord-Nederland gekeken of op de betreffende locatie het zoetzout grensvlak dieper of ondieper ligt dan 5 meter onder maaiveld. Vervolgens wordt per locatie getoetst binnen welke klasse de kwel ter plekke valt. De kwelkaart van de stationaire huidige situatie van het MIPWA-model dient als basis (Figuur 3.8). Tenslotte wordt getoetst of het op de locatie om een lichte, matig zware of zware bodem betreft.

De in paragraaf 3.3.3 onderscheiden bodemtypen leiden niet tot duidelijk verschillende diktes van de zoetwaterlens. Bij de opschaling volstaat het om een onderscheid te maken tussen "lichte", "matig zware" en "zware" bodemtypes.

Tabel 6.1: Classificering bodemtypes voor opschaling

Bodemtype	Lutumgehalte	Classificering voor opschaling
Zand	< 10%	Lichte bodem
Lichte zavel	< 20%	Lichte bodem
Zavel	20 - 30%	Matig zware bodem
Zware zavel	30 - 40%	Matig zware bodem
Klei/ zeer zware zavel	40 - 50%	Zware bodem
Zware (knip) klei	> 50 %	Zware bodem

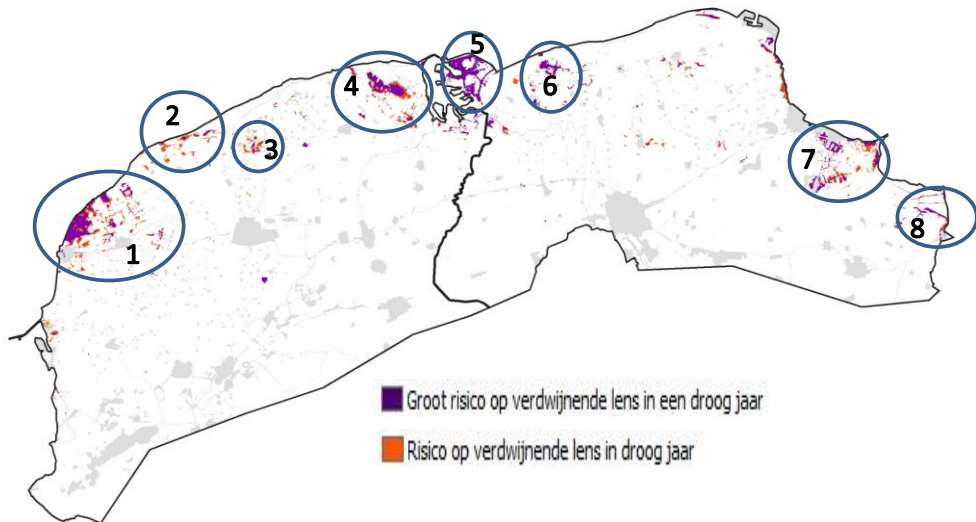
6.2 Verziltingsrisicokaart huidige situatie

6.2.1 Resultaat

Het combineren van de data, inzichten en criteria leidt tot de verziltingsrisicokaart weergegeven in Figuur 6.2.

Het blijkt dat op een aantal locaties de zoetwaterlens dreigt te verdwijnen in een droog jaar. Deze zijn in de figuur genummerd. Het meest in het oog springen de volgende gebieden:

1. Het gebied ten noordwesten van Franeker. Dit gebied heeft het grootste areaal aan potentieel verziltende landbouwgrond. Daarnaast is er hier ook sprake van bodemdaling. Wanneer bodemdaling gepaard gaat met dalende oppervlaktewaterpeilen leidt dit tot een toename van de kwelflux en zodoende tot een verhoogd risico op het verdwijnen van de zoetwaterlens.
2. De lichte zavelgronden in het gebied het nieuw Bildt, met name in de Noorderleegpolder en de polder Oude Bildtpollen. Deze polders zijn relatief recent ingepolderd, hebben een peil van respectievelijk gemiddeld -0.78 en -0.45 m NAP en liggen langs pal de kust, wat relatief grote kwel betekent.
3. De overwegend zware gronden in de Marrumermieden ten zuiden en zuidoosten van Marrum. Vanwege een peil tot -2m NAP is er sprake van hoge kwelflux, wat leidt tot een kleinere dikte van de neerslaglenzen.



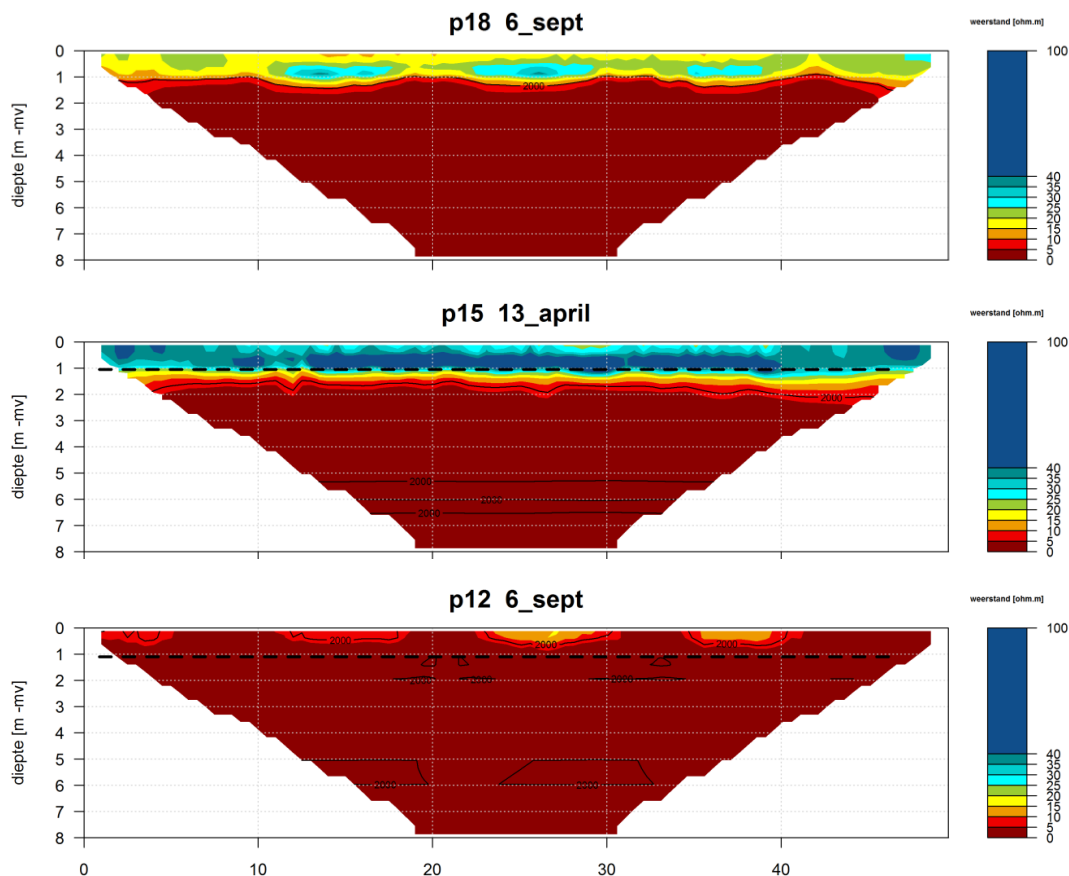
Figuur 6.2: Verziltingsrisicokaart voor de huidige klimaatsituatie. De paarse kleur indiceert dat een grote kans bestaat dat de zoetwaterlens in een droog jaar verdwijnt; een oranje kleur geeft aan dat de zoetwaterlens mogelijk verdwijnt in een droog jaar.

4. De lage gronden ten zuidwesten van Anjum. Vanwege peilen tot ruim onder -1m NAP is er sprake van een sterke kwelflux. Zowel lichte gronden (meer kustwaarts) als zware gronden (meer landinwaarts) komen voor.
5. Het gebied de Marnewaard heeft geen of nauwelijks landbouwgronden. Ondanks dat dit gebied onder druk van verzilting staat, wordt in het kader van dit onderzoek hier geen aandacht aan besteed.
6. Een gebied ruwweg tussen Kruisweg, Kloosterburen en Pieterburen. Het regionale grondwatermodel berekent hier zeer hoge kwelfluxen (> 3mm/d), waardoor in de opschaling deze gebieden een groot risico voor verzilting kennen.
7. Een gebied dat deel uitmaakt van het Oldambt tussen Delfzijl-Zuid, de Johanneskerkhovenpolder en Niewolda. Grote delen van het gebied liggen onder zeeniveau zodat relatief hoge kwel voorkomt. De gronden zijn zwaar landinwaarts. In de aan de kust gelegen jongere gronden komen ook lichtere bodems voor.
8. De laaggelegen polders in Reiderland ten oosten van Finsterwolde en ten noorden van Nieuwe Schans. Kenmerkend is dat de bodems zwaar zijn. Het opkwellend grondwater is hier vaak minder zout dan in de rest van het studiegebied (< 5000 mg/l).

Samengevat blijkt dat in de huidige situatie in een aantal gebieden er een (groot) risico is dat de zoetwaterlens verdwijnt tijdens een droog jaar zoals 2003. Echter in het overgrote deel van de noordelijke kuststrook blijven zelfs onder droge omstandigheden de zoetwaterlenzen op het perceel intact.

6.2.2 Verificatie verziltingsrisicokaart aan veldonderzoek

Drie van de CVES-metingen bevinden zich op locaties die op de verziltingsrisicokaart als riskant worden aangemerkt. Dit zijn de percelen Voorrijp, Anjum en Johanneskerkhovenpolder. Figuur 6.3 toont de weerstand van de ondergrond van de betreffende percelen gemeten in de meetperiode in september (Johanneskerkhovenpolder in april, vanwege mislukte meting in september). Hoewel augustus nat was, zijn deze metingen gedaan in de droogste periode van de twee meetrondes.



Figuur 6.3: weerstandsmetingen van percelen, die volgens de verziltingsrisicokaart verzilten onder droge omstandigheden.

Uit de figuur blijkt alleen in perceel 18, Voorrijp sprake is van een echte zoetwaterlens. In perceel 15 is sprake van zoetwater onder het drainniveau, maar geen echte lensvorming waarschijnlijk vanwege de ongerijpte klei op enkele meters diepte. Omdat de zone waarin zoetwater voorkomt in beide gevallen dun is, is het denkbaar dat in droge periode zoals in 2003 de zoetwaterlens verdwijnt onder deze percelen. Voor deze percelen corresponderen de resultaten van de verziltingsrisicokaart met de gemeten CVES-weerstandspromen, hetgeen de betrouwbaarheid van de kaart verhoogt.

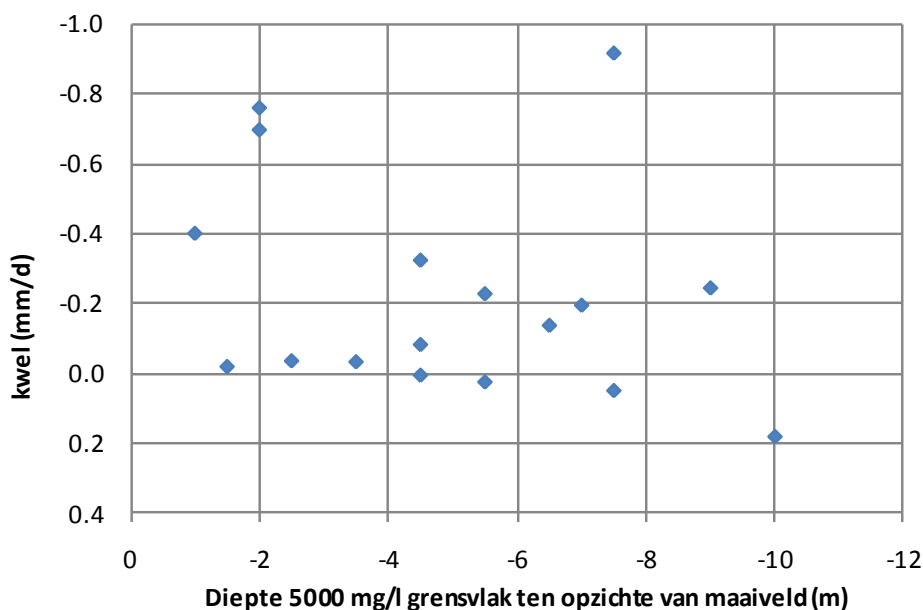
Omgekeerd zien we in percelen Finsterwolde (8), Blessum (13) en Niewolda (14) dat er niet of nauwelijks een neerslaglens ontstaat, terwijl de verziltingskaart hier geen risico voor verzilting geeft. Voor perceel Niewolda en Blessum wordt dit veroorzaakt door het feit dat het perceel zich in een overgangsgebied van hoog naar laag peil bevindt, waardoor het regionale MIPWA-model lage kwel berekent, terwijl deze waarschijnlijk hoog is (zie onderstaand).

Voor perceel Finsterwolde wordt dit veroorzaakt door het feit dat in de basiszoetzoutkaart de 5000 mg/l niet wordt gehaald. Het grondwater is hier brak, waarschijnlijk vanwege de aanwezigheid van historisch zeewater opgemengd met Eemswater. In de CVES-meting is goed zichtbaar dat de weerstand de 5 ohmm nauwelijks overschrijdt, wat indiceert dat het hier om brak en niet zout grondwater gaat.

De overige 13 CVES-weerstandsmetingen indiceren geen risico dat de zoetwaterlens verdwijnt. Dit wordt beaamd door het beeld dat de verziltingsrisicokaart laat zien.

Over het algemeen corresponderen de metingen met de berekende en opgeschaalde verziltingsrisicokaart. Op vier percelen is dit niet het geval. In twee gevallen is dit te wijten aan onvoldoende nauwkeurigheid van de kwelkaart van het regionale MIPWA-model. Het MIPWA-model is niet geijkt op fluxen, waardoor de betrouwbaarheid van het kwelresultaat is verminderd.

Dit blijkt ook wanneer men de dikte van de zoetwaterlens uitzet tegen de kwelfluxen uit MIPWA (Figuur 6.4). Uit de figuur is geen duidelijk kwantitatief verband tussen de hoogte van de kwelflux en de dikte van de zoetwaterlens waar te nemen, terwijl dit uit theoretisch oogpunt en modelmatig wel moet gelden.



Figuur 6.4: correlatie kwel berekend met regionaal MIPWA model ten opzichte van de gemiddelde diepte van het 5000 mg/l grensvlak geobserveerd in de CVES-metingen

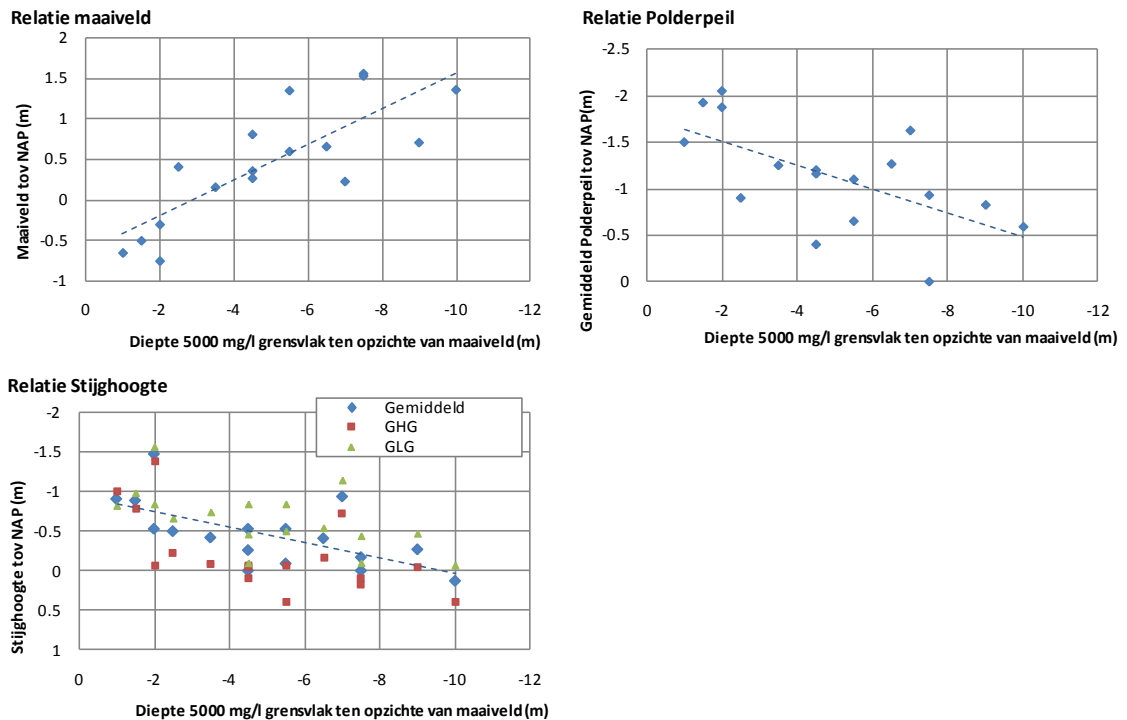
Dat het verband tussen dikte van de lens en kwelflux wel lijkt te bestaan blijkt uit het volgende: theoretisch gezien is de kwel evenredig met het potentiaalverschil tussen de grondwaterstand boven en onder de deklaag. Bij een relatief hoge freatische grondwaterstand of oppervlaktewaterpeil treedt eerder infiltratie op; bij een relatief hoge grondwaterstand onder de deklaag in het regionale pakket is eerder sprake van kwel.

Figuur 6.5 toont het verband tussen de dikte van de zoetwaterlens het polderpeil, de stijghoogte in het watervoerend pakket op basis van nabije metingen en maaiveld bij de 18 meetlocaties.

Uit de figuur is gemakkelijk een lineaire relatie af te leiden tussen de dikte van de lens en de genoemde parameters, wanneer gebruik gemaakt wordt van metingen. Er zijn drie redenen dat de kwelkaart van het regionale model geen duidelijk verband laat zien:

- Er is niet geijkt op fluxen in het regionale grondwatermodel
- Op gebieden die een overgang vormen tussen bijvoorbeeld hoog en laag peil is het model of de modelinput onvoldoende fijn.
- Er is onvoldoende data beschikbaar om het gewenste detailniveau van het model te bereiken.

Opgemerkt dient te worden dat het model niet is ontwikkeld om uitspraken te doen over de ruimtelijke schaal van een perceel. Wellicht dat een nieuwere versie van het regionale model een consistenter beeld geeft.



Figuur 6.5: correlaties tussen dikte van de lens en maaiveld, stijghoogte regionaal pakket en polderpeil

6.3 Verziltingskaart toekomstige situatie

Uit het voorgaande blijkt dat de kwel, neerslag en verdamping de bodem- en drainagekarakteristieken de dynamiek van de zoetwaterlens op een (gedraineerd) perceel bepalen. In de huidige situatie blijkt dat vooral op gebieden met hoge kwel een risico op het verdwijnen van de zoetwaterlens bestaat. In het grootste deel van Noord-Nederland is geen sprake van verdwijnende zoetwaterlensen in de huidige situatie.

Door de voorspelde verandering van het klimaat veranderen echter de hydrologische omstandigheden. Paragraaf 2.4 behandelt uitgebreid de toekomstige autonome ontwikkelingen in het gebied. Binnen deze paragraaf wordt volstaan met een korte opsomming van de voor de zoetwaterlens relevante ontwikkelingen. Deze zijn de volgende:

- Door stijging van de zeespiegel neemt de stijghoogte in het regionale watervoerende pakket toe, waardoor ook de kweldruk in de percelen toeneemt. Deze toename van kweldruk treedt vooral op in de strook vlak langs de kust.
- Door verandering van de neerslag- en verdampingspatronen treden in de toekomst warmere en drogere zomers en nattere winters op. Dit leidt tot langere droge periodes in de zomer die een potentieel gevaar vormen voor de aanwezige zoetwaterlensen.
- Een niet klimaat-gerelateerde autonome verandering is de bodemdaling. Naast de bodemdaling door klink, veenoxidatie en mindere mate tektoniek treedt in delen van Noord-Nederland bodemdaling op door de gaswinning en zoutwinning. Bodemdaling kan op twee manieren leiden tot toenemende verzilting. Als eerste kan dit gebeuren doordat het oppervlaktewater peil "meedaalt" met de bodemdaling, waardoor kwel zal toenemen. Ten tweede verkleint een daling van de bodem de afstand van het maaiveld -en dus de wortelzone- tot het historisch zout.

6.3.1 Uitgangspunten

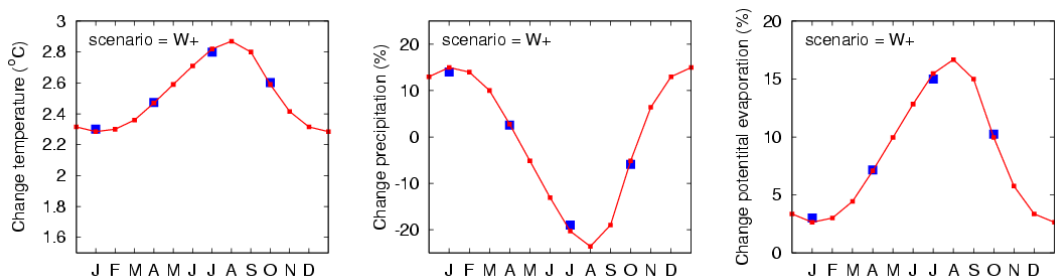
Om de toekomstige verziltingsrisicokaart te berekenen worden dezelfde stappen doorlopen als beschreven in hoofdstuk 5:

Al eerste wordt een modeldatabank gevuld door de uitkomsten van berekeningen met 48 perceelsmodellen. Hiervoor wordt hetzelfde basismodel gebruikt met dezelfde aannames voor bodem- en drainageparameters. Gezien het geringe verschil tussen een deklaag van 2 en 3 meter is ervoor gekozen om alleen de set modelberekeningen te doen voor een deklaagdikte van 2 meter dik.

De bandbreedte van de kwel wordt in de toekomstige berekeningen dezelfde gehouden. Op basis van landelijke berekeningen gedaan met het NHI stijgt de kwel in de regionen vlak langs de kust met maximaal tienden millimeters per dag. In het kader van het project COMCOAST zijn voor de waterschappen Hunze en Aa's en Noorderzijlvest berekeningen gedaan om te kwantificeren wat de kwelverandering is bij een zeespiegelstijging van 0,5 meter, maar ook met peilverlaging als gevolg van bodemdaling. Ook uit deze kaarten blijkt dat het grootste deel van het gebied gevrijwaard blijft van grote kwelverandering. Direct achter de dijk is wel sprake van een toename van kwel van 0,5 tot 1 mm/d. Dit betreft echter een strook van slechts enkele modelcellen (~max 100 meter). Verder van de zee dooft het effect snel uit.

De toename is in de orde van maximaal enkele tienden van millimeters per dag. Er is geen reden om de bandbreedte van de kwel aan te passen.

De neerslag- en verdampingsreeksen zijn aangepast aan de verwachte toekomstige situatie. Hierbij is het uitgangspunt het KNMI-scenario W+ voor het jaar 2050. De verandering in de neerslag is bepaald met de klimaatgenerator van het KNMI (http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly). Hiermee zijn de neerslagreeksen van 1994 tot 2005 getransformeerd naar neerslagreeksen onder + omstandigheden. De verdampingsreeksen zijn voor dezelfde jaren omgezet naar de verwachte verdamping in 2050 op basis van de percentuele veranderingen voorspeld onder het W+ scenario (Figuur 6.6).



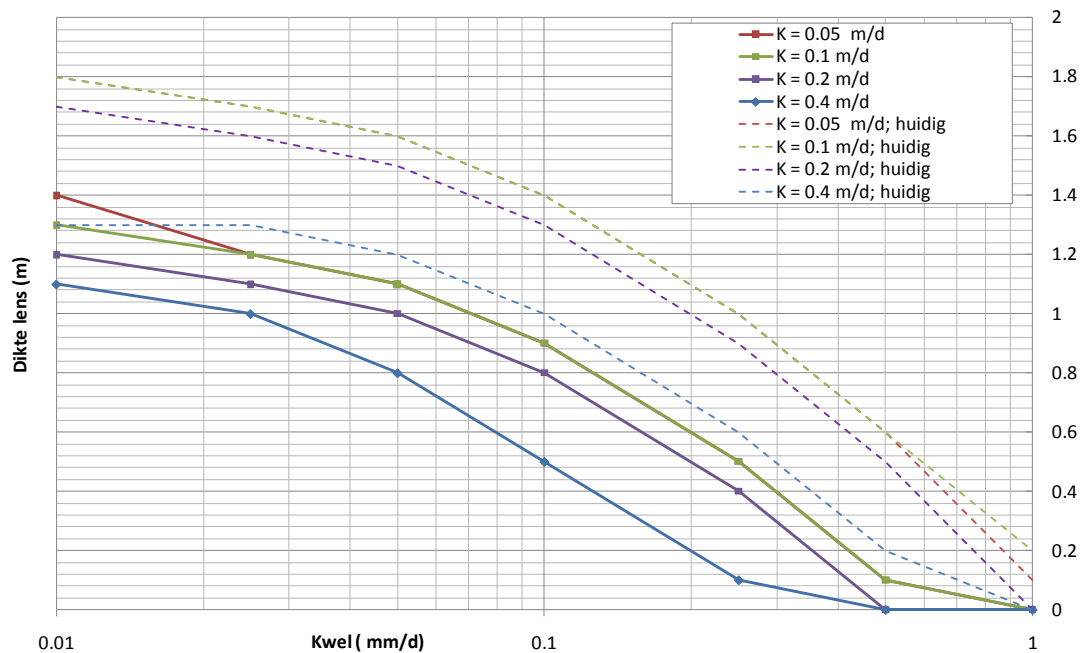
Figuur 6.6: verandering in de temperatuur, neerslag en verdamping, volgens het KNMI '06 W+ scenario (uit Lenderink, 2006).

Uit de figuur blijkt dat in het zomerseizoen zowel tot 20% minder regel valt als ook dat de potentiële verdamping tot ruim 15% toeneemt. Beide ontwikkelingen dragen bij aan een sterk verminderde grondwateraanvulling in de zomermaanden in het W+ scenario. Zoals in de berekeningen voor de huidige situatie is de grondwateraanvulling berekend met de modelcode SWAP.

6.3.2 Modelresultaat en criteria

Figuur 6.7 toont de modelresultaten van de dikte van de zoetwaterlens uitgezet tegen de kwel. De minimale lensdikte wordt bereikt in het jaar 2003 dat naar W+ is getransformeerd.

Verschillende curven zijn geplot, die elk een andere k-waarde representeren. In de figuur zijn ook de curven van Figuur 5.16, de huidige situatie, geplot.



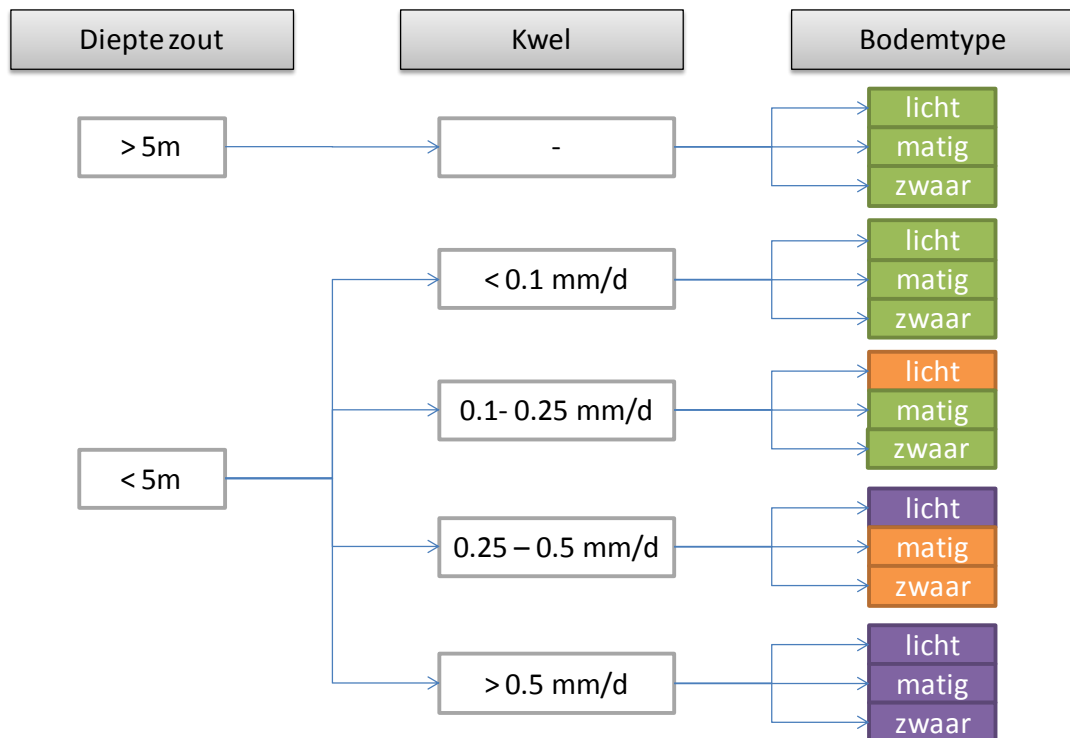
Figuur 6.7: modelresultaten dikte zoetwaterlens bij een deklaag van 2 meter voor de toekomstige situatie (W+) met alleen aangepaste grondwateraanvulling. De gestippelde lijnen tonen de resultaten voor de huidige situatie.

Uit de figuur blijkt dat in de situatie met de aan de toekomst aangepaste veranderde neerslag- en verdampingsreeks de neerslaglens kan verdwijnen bij veel lagere kwelflux.

Met gebruikmaking van dezelfde definitie van risicoklassen als in paragraaf 6.1...:

- Geen risico. Als de berekende zoetwaterlens bij een zekere combinatie van parameters nooit dunner wordt dan 0.5 meter, dan wordt gesteld dat er geen risico is op het verdwijnen van de zoetwaterlens.
- Risico. Als de berekende zoetwaterlens tussen de 0.25 en 0 meter komt dan wordt gesproken van een risico van verdwijnen
- Groot risico. Als uit de modelresultaten blijkt dat de zoetwaterlens geheel verdwijnt bij een zekere combinatie van parameters dan wordt gesteld dat er een groot risico is voor het verdwijnen van de zoetwaterlens.

... leidt dit tot het volgende beslisdigram voor de toekomstige situatie (Figuur 6.8).

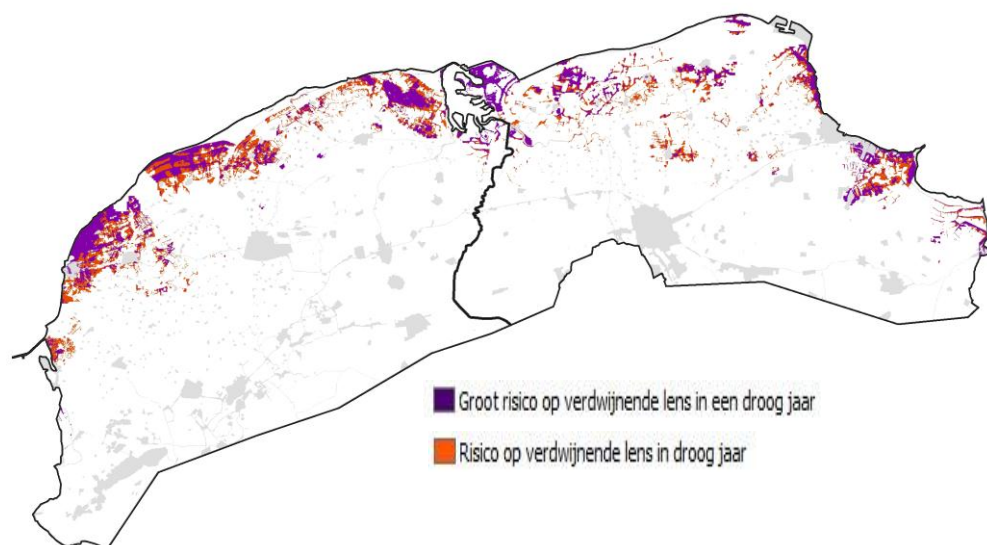


Figuur 6.8: beslisdigram voor het bepalen of een combinatie van zoutdiepte, kwel en zwaarte van de bodem leidt tot geen (groen), matig(oranje) of groot (paars) risico leidt. De indeling is op basis van de modelresultaten voor de toekomstige situatie.

6.3.3 Resultaat

Op dezelfde wijze als in paragraaf 6.2.1 ontstaat de toekomstige verziltingsrisicokaart (Figuur 6.9).

De figuur toont een groot verschil tussen de toekomstige situatie en de huidige situatie. Op een groot areaal aan landbouwgebieden dreigt de zoetwaterlens op enig moment te verdwijnen in een droog jaar.



Figuur 6.9: Verziltingsrisicokaart voor de toekomstige klimaatsituatie. De paarse kleur indiceert dat een grote kans bestaat dat de zoetwaterlens in een droog jaar verdwijnt; een oranje kleur geeft aan dat de zoetwaterlens mogelijk verdwijnt in een droog jaar.

Deze figuur toont alleen het effect van toenemende verdamping en afnemende neerslagintensiteit in de zomer. Veranderingen in de kwel door stijgende zeespiegelstijging of dalende peilen door maaiveldaling zijn niet gebruikt. De reden hiervoor is dat er geen goede kwelkaart voor de toekomstige situatie beschikbaar is vanuit de bestaande modelstudies. De verandering van kwel door klimaatverandering is wel berekend in de landelijke analyse van het NHI. Deze resultaten zijn echter onvoldoende nauwkeurig en specifiek om in deze kaart te verwerken.

Zowel zeespiegelstijging als bodemdaling leiden in het algemeen tot toenemende kwel, zodat wanneer goede data beschikbaar komt waarschijnlijk zelfs in meer gebieden een risico op verdwijnende zoetwaterlens wordt berekend.

6.4 Modelresultaten onverzadigde zonemodellen

De voorgaande resultaten hebben alle betrekking op de stroming van verzadigd grondwater en het verdwijnen van de neerslaglenzen. Zoals beredeneerd in paragraaf 4.7 en 5.1 is het transport van zout in de onverzadigde zone belangrijk om te bepalen of bij een gewas zoutschade op zal treden.

Transport van zout in de onverzadigde zone treedt op door de capillaire werking van de bodem en de verdamping van de gewassen. De bepalende parameters voor de mate van transport zijn het type gewas, het type bodem (o.a. doorlatendheid) en de drainagediepte.

Binnen dit onderzoek is de stroming van brak grondwater in de onverzadigde zone onderzocht met de modelcode SWAP (Kroes, et.al., 2000). Voor een viertal scenario's is berekend hoe de chlorideconcentratie in het grondwater in de onverzadigde zone verandert bij verschillende configuraties van gewassen, bodemtype en drainage.

De verschillende gewassen, bodemtype en drainagediepte zijn zo gekozen dat ze de in Noord-Nederland meest voorkomende situatie representeren.

Het doel van de berekeningen is om de orde van de ernst van de verzilting van de onverzadigde zone te bepalen en met name de effecten van de verschillende parameters ten opzichte van elkaar duidelijker te krijgen. De modellen zijn niet geijkt wegens het ontbreken van meetgegevens. Hierdoor is het niet bekend hoe exact de berekende resultaten zijn en moet uiterst voorzichtig omgegaan worden met het trekken van kwantitatieve conclusies.

Wel kunnen we stellen dat de orde van de mate van verzilting een idee geeft of er een gevaar voor verziltingsschade kan bestaan of niet. In de modelcode SWAP zijn de resultaten opgenomen van vele experimenten op het gebied van bodem- en gewaseigenschappen. Zodoende verschaffen de berekeningsresultaten aanwijzingen voor het feit of bepaalde gebieden en combinaties van bodemparameters en gewassen meer of minder risico lopen.

6.4.1 Uitgangspunten

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een viertal scenario's te weten:

- 1) Een droog jaar (2003)
- 2) Een gemiddeld jaar (2005)
- 3) Een gemiddeld jaar in het W+ scenario
- 4) Een droog jaar in het W+ scenario

Voor elk van de scenario's is de chlorideconcentratie op een diepte van 50 cm onder maaiveld bepaald. De wortels van de in Noord-Nederland meest gangbare gewassen dringen tot deze diepte door. Het verloop van de chlorideconcentratie is berekend voor de periode 1997-2007. Dit garandeert voldoende "inslingertijd", hoewel SWAP sneller een stabiele oplossing berekent dan SEAWAT in de verzadigde zone modellen.

De invoerreeksen voor neerslag en verdamping zijn afkomstig van de KNMI-stations Leeuwarden en Eelde. Voor de berekeningen van de toekomstscenario's zijn de neerslag- en verdampingsreeksen getransformeerd met de "klimaatgenerator" van het KNMI (zie paragraaf 6.3.1). Veranderende kwel en andere autonome ontwikkelingen zijn niet beschouwd.

Drie typen gewassen zijn als invoer voor SWAP gebruikt. Dit zijn:

- Gras
- Tarwe
- Aardappelen

Alle drie de gewassen zijn veel voorkomend in de noordelijke kuststrook. De keuze voor deze gewassen is gemotiveerd doordat gras het hele jaar groeit, waardoor het van de verschillende gewassen het meest verdampt. Tarwe komt veel voor en wortelt naar waarschijnlijkheid het diepst. Aardappelen en dan met name pootaardappelen zijn economisch gezien het belangrijkste gewas van de regio. Er bestaan uiteraard grote verschillen tussen soorten tarwe, aardappelen en gras. In deze berekeningen zijn de in SWAP opgenomen standaardwaarden voor de betreffende gewassen aangehouden.

Drie typen bodems zijn gekozen:

- Lichte zavel
- Zavel/lichte klei
- Zwarte klei

Voor de keuze geldt dezelfde argumentatie als in paragraaf 5.4. Deze type bodems zijn representatief voor de kuststrook van Noord-Nederland.

Uit de analyse van de veldwerkresultaten blijkt dat de diepte van de drainage belangrijk is voor de mate van verzilting in de wortelzone. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een drainagediepte van 100 en 150 cm onder maaiveld. Beide drainagedieptes komen in het gebied voor (paragraaf 3.3.2).

Binnen SWAP wordt aan de onderzijde van het model een vast chloridegehalte opgegeven. Het is binnen SWAP niet mogelijk deze te variëren. De in de modellen gebruikte onderrandvoorwaarde voor de chlorideconcentratie is 10.000 mg/l. De keuze voor de chlorideconcentratie is hoog, maar deze komt her en der voor binnen Noord-Nederland. De keuze voor een hoge onderrandvoorwaarde is gemotiveerd door het voornemen om de onderlinge verschillen in gewas-bodem-drainagediepte-combinaties zo zichtbaar mogelijk te maken.

De kwel is dusdanig hoog gezet dat het chloridegehalte altijd tot aan drainageniveau staat. Dat dit in werkelijkheid niet zo is, doet in deze analyse niet ter zake. In deze modelberekeningen gaat om het gedrag van het onverzadigd water boven het drainageniveau. We moeten weten wat er gebeurt als de neerslaglens verdwenen mocht zijn of boven een drain die veel zout grondwater aantrekt.

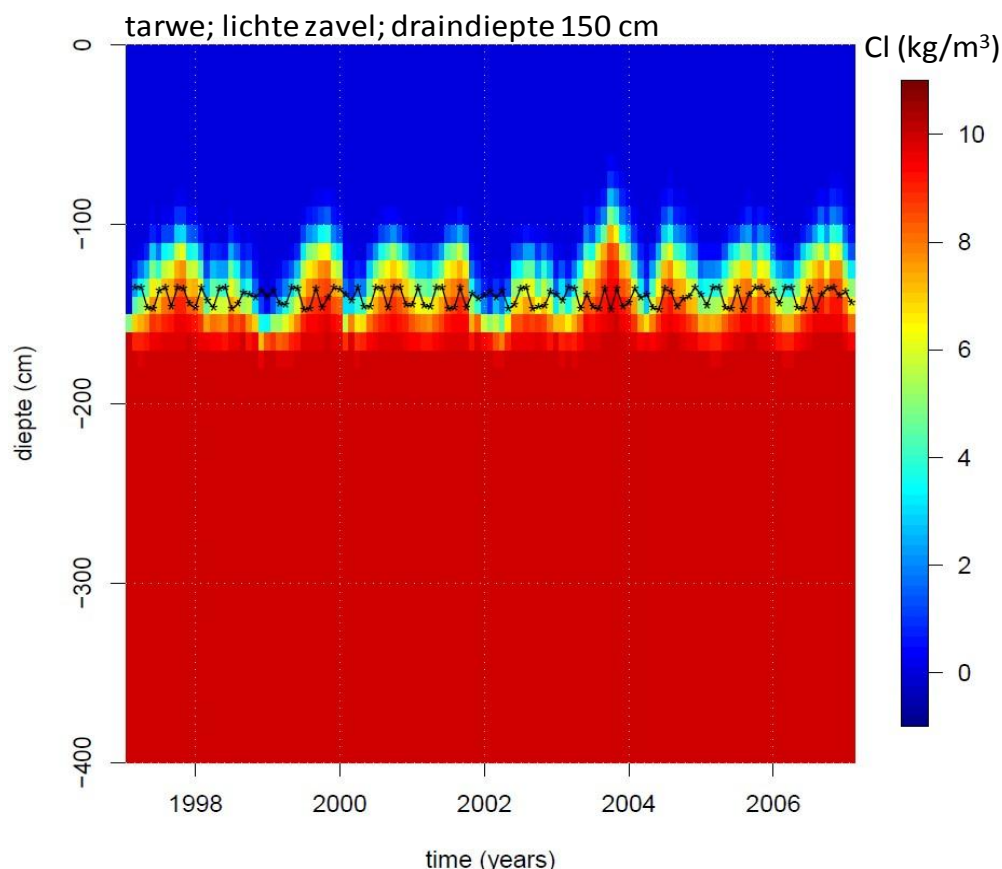
Vanwege de aanname van hoge kwel is in de SWAP-berekeningen de grondwaterstand altijd tot aan het drainageniveau. Dit is een worst-case benadering. Uit de berekeningen

met SEAWAT en de metingen van het veldonderzoek blijkt dat bij minder hoge kwelniveaus de grondwaterstand kan dalen tot ruim onder drainageniveau. Alleen bij hoge kwelniveaus is de grondwaterstand steevast ter hoogte van het drainageniveau.

6.4.2 Resultaten

Huidige situatie

Voor elk van de combinaties van gewas-bodem-drainagediepte is de chlorideconcentratie berekend op de diepte van 50 cm onder maaiveld. Figuur 6.10 toont een voorbeeld van het verloop van de chlorideconcentratie met de diepte in de periode 1997-2007 voor de combinatie tarwe-lichte zavel-drainage 150 cm.



Figuur 6.10: Voorbeeld van de met SWAP berekende chlorideverdeling (kg/m^3) in de ondergrond in de tijd. De zwarte lijn toont de grondwaterstand die redelijk constant rond drainageniveau blijft.

In deze figuur is duidelijk te zien dat in de bodem ondieper dan 80 cm onder maaiveld op geen enkel moment sprake is van een verhoogde concentratie chloride in de ondergrond.

Het zij nogmaals opgemerkt dat de uitgangswaarde van het grondwater 10.000 mg/l is. Dit is voor de meeste delen van Noord-Nederland een hoge waarde. De berekeningen zijn op basis van een worst-case benadering. De berekende getallen geven niettemin een indicatie van mogelijke verzilting van de wortelzone.

Tabel 6.2 toont de maximale concentratie op 50 cm – mv voor de scenario's van 2003 en 2005. Uit deze tabel blijkt dat bij een draaindiepte van 150 cm onder maaiveld in de huidige situatie niet een hogere chlorideconcentratie wordt berekend dan 699 mg/l. Er is sprake van een kleine stijging van de chlorideconcentratie in de bodem op 50 cm bij grasland tijdens het zeer droge jaar 2003. Bij aardappel en tarwe berekent SWAP

concentraties van lager dan 300 mg/l. De modelresultaten in de scenario's met een draindiepte van 150 cm onder maaiveld tonen dat er in de huidige situatie bij een diepe drainagebasis geen verzilting van de wortelzone ontstaat door optrekken van zout uit het grondwater.

Bij een – in de praktijk overigens meer voorkomende – draindiepte van 100 cm onder maaiveld is de situatie anders. Vanwege het feit dat gras het hele jaar groeit en dus verdampt, is dit het gewas waarbij de hoogste chlorideconcentraties in het profiel worden berekend. Bij tarwe en aardappelen is ook een duidelijke verhoging van de berekende chlorideconcentratie te zien, wanneer men kijkt naar bodems met lichte zavel en zavel/lichte klei. Voor de situatie van 2005 is de maximaal berekende chloridewaarde op 50 cm niet bijzonder hoog voor tarwe en aardappelen (<2000 mg/l) – de worst case aannames in ogenschouw nemend.

Tabel 6.2: maximale berekende chlorideconcentraties op diverse dieptes, voor diverse gewassen, voor diverse bodems voor de jaren 2003 en 2005 (huidige situatie)

Chloride gehalte op 50 cm onder maaiveld (draindiepte 150 cm)			
		2003	2005
Lichte zavel	gras	699	13
	tarwe	98	1
	aardappelen	211	1
Zavel/lichte klei	gras	186	22
	tarwe	37	1
	aardappelen	16	0
Klei	gras	0	0
	tarwe	0	0
	aardappelen	0	0

Chloride gehalte op 50 cm onder maaiveld (draindiepte 100 cm)			
		2003	2005
Lichte zavel	gras	7090	2630
	tarwe	3150	553
	aardappelen	5520	896
Zavel/lichte klei	gras	7780	4470
	tarwe	4120	584
	aardappelen	6260	1870
Klei	gras	76	23
	tarwe	31	1
	aardappelen	8	1

In een droge zomer zoals die van 2003 is te zien dat het berekende chloridegehalte op 50cm diep hoger is dan in 2005. Bij aardappelen is een hogere concentratie berekend dan bij tarwe. Dit wordt veroorzaakt doordat aardappelen in de droogste periode van 2003 meer verdampen dan tarwe.

In bodems met het bodemtype zavel/lichte klei stijgt het zout het snelst in het profiel. In deze bodems worden de hoogste concentraties aangetroffen op de beschouwde diepte. De

vermoedelijke reden hiervoor is dat de capillaire werking in meer kleiige gronden sterker is dan in meer zandige gronden.

Al het bovenstaande geldt niet voor zware kleigronden. Bij zware klei is geen sprake van een verhoogde chlorideconcentratie op 50 cm onder maaiveld, ongeacht het (theoretisch verbouwde¹) gewas, draandiepte of klimaatscenario. De belangrijkste reden hiervoor is dat het optrekken van zout in droge periodes gebeurt. Tijdens droge periodes krimpt de klei waardoor scheurtjes (soms grote scheuren) ontstaan. Hierdoor reduceert de capillaire werking sterk, waardoor het zout nauwelijks meer op kan trekken.

Toekomstige situatie

Dezelfde berekeningen zijn uitgevoerd voor de twee toekomstscenario's. Tabel 6.3 toont de maximale concentratie op 50 cm onder maaiveld voor de toekomstscenario's 2003 W+ en 2005 W+.

Tabel 6.3: maximale berekende chlorideconcentraties op diverse dieptes, voor diverse gewassen, voor diverse bodems voor de jaren 2003W+ en 2005W+ (toekomstige situatie)

Chloride gehalte op 50 cm onder maaiveld (draandiepte 150 cm)			
		W+ scenario 2003	W+ scenario 2005
Lichte zavel	gras	1590	6
	tarwe	828	10
	aardappelen	507	5
Zavel/lichte klei	gras	663	41
	tarwe	344	15
	aardappelen	35	3
Klei	gras	0	0
	tarwe	0	0
	aardappelen	0	0

Chloride gehalte op 50 cm onder maaiveld (draandiepte 100 cm)			
		W+ scenario 2003	W+ scenario 2005
Lichte zavel	gras	8610	3850
	tarwe	5960	909
	aardappelen	6900	2080
Zavel/lichte klei	gras	8980	6930
	tarwe	7790	4560
	aardappelen	7290	3970
Klei	gras	309	47
	tarwe	186	16
	aardappelen	13	2

Uit de tabel volgt dat in de toekomstige scenario's het niveau van 50 cm onder maaiveld nauwelijks verzilt bij een drainageniveau van 150 cm onder maaiveld. In het geval van lichte zavel ontstaat volgens de berekeningen in een zeer droge zomer, op een grasland een enkele keer een licht brakke situatie (> 1000 mg/l).

¹ Er zijn uiteraard meer redenen dan dreigende verzilting of een gewas verbouwd wordt op een zeker type grond.

De conclusie op basis van deze berekeningen is dat er in de toekomst het risico van de verzilting van de wortelzone klein is bij een drainageniveau van 150 cm onder maaiveld.

De tabel met berekeningsresultaten voor de situatie met een drain van 100 cm onder maaiveld laat wederom een ander beeld zien. In het "gemiddeld toekomstig jaar" 2005 W+ tonen de berekeningen een aanzienlijke verzilting van de wortelzone bij de combinaties gras en lichte zavel/klei.

Bij de combinaties aardappel/lichte klei en tarwe/lichte klei wordt nu ook een toename van verzilting berekend. De reden hiervoor is de relatief sterke capillaire werking in een dergelijke bodem.

In de zware kleigronden is bij een draandiepte van 100 cm enig effect zichtbaar op het niveau van 50 cm onder maaiveld. De berekende concentraties zijn echter veel te laag om een probleem te zijn voor de landbouwgewassen.

Samengevat leiden de berekeningsresultaten tot de volgende bevindingen:

- Bij een drainagediepte van 150 cm treedt noch in de huidige, noch in de toekomstige situatie verzilting op in de wortelzone voor de beschouwde combinaties van bodemtypen en landbouwgewassen.
- Bij een drainagediepte van 100 cm blijkt dat in de huidige situatie het berekende maximale chloridegehalte op een diepte van 50 cm voor gras meer dan brak is.
- In een gemiddeld jaar als 2005 wordt voor tarwe en aardappelen nauwelijks een risico van verzilting berekend bij een drainagediepte van 100 cm.
- Bij lichte klei gronden worden bij een drainagediepte van 100 cm in een droog jaar de hoogste chloridegehalten berekend. Zowel voor gras, tarwe als aardappelen wordt een risico van verzilting berekend in een droog jaar als 2003. Dit geldt overigens ook voor deze gewassen op lichte zavelgronden
- Zware kleigronden blijven in de berekeningen gevrijwaard van toenemende verzilting ongeacht de drainagediepte, het klimaatscenario of het type gewas.
- Uit de toekomstberekeningen blijkt dat er wel een verziltingsrisico optreedt bij alle gewassen voor lichte klei gronden in een gemiddeld toekomstig jaar 2005W+.

6.5 Conclusies en aanbevelingen

6.5.1 Conclusies

Deze paragraaf toont puntsgewijs de belangrijkste conclusies van de modellering en de opschaling:

- Uit de modelresultaten en opschaling blijkt dat in de huidige situatie in een beperkt aantal gebieden de zoetwaterlens kan verdwijnen in een droog jaar;
- De resultaten van de opschaling worden bevestigd door de CVES-metingen;
- Drainage (diepte, onderlinge afstand) speelt een belangrijke rol in het aantrekken of beperken van verzilting;
- De grootte van de regionale kwelflux is zeer bepalend voor het potentieel verdwijnen van de neerslaglenzen;
- Het is raadzaam voorzichtig te zijn met maatregelen die kwelvergroten werken (zoals peilverlaging na bodemdaling);
- Verzilting van de wortelzone ontstaat door processen in de onverzadigde zone en de verzadigde zone. In dit onderzoek is met name het verzadigd grondwater beschouwd vanwege de bestaande inzichten bij de start van het onderzoek;
- Vanwege een toenemend neerslagtekort ontstaat in een aanzienlijk deel van de noordelijke kustzone het risico van verdwijnende neerslaglenzen;
- De diepte van de drain is zeer bepalend voor de kans dat zout water in de wortelzone terecht komt;
- In zavelige bodems, dat wil zeggen bodems met een hoog lutumgehalte, maar geen zware klei, is sprake van de hoogste capillaire opstijging en dus het grootste risico van zout;
- In lichte zavelbodems en zavel/kleibodems wordt geen verziltingsrisico berekend in een normaal jaar zoals 2005. In een droog jaar als 2003 wordt een toename van het maximale chloridegehalte in de wortelzone berekend voor gras, tarwe en aardappelen;
- Als het klimaat verandert volgens het W+ scenario dan volgt uit de SWAP-berekeningen dat er voor zavelbodems een risico bestaat dat in een normaal jaar de wortelzone van de meest voorkomende gewassen in Noord-Nederland vanuit het grondwater verzilt;

6.5.2 Kanttekeningen en nuanceringen:

Tijdens het onderzoek zijn aannames gedaan en keuzes gemaakt, die bepalend zijn voor de uiteindelijke resultaten en conclusies. Meestal zijn aannames gedaan door een gebrek aan informatie, bijvoorbeeld heterogeniteit van bodems, of kennis, zoals de vraag hoeveel zout tot opbrengstderving leidt voor allerlei verschillende gewassen.

Bij de discussie rondom de ernst van verzilting en het toepassen van maatregelen en oplossingen is het verstandig om enkele kanttekeningen en nuanceringen in het oog te houden. Deze worden in deze paragraaf puntsgewijs genoemd:

- De kaarten zijn gebaseerd op het eenmalig verdwijnen van de neerslaglenzen in een droge periode. Dit kan dus maar één dag zijn in het jaar.
- Een verdwijnende zoetwaterlens betekent niet altijd verzilting van de wortelzone. Door verschillende omstandigheden zoals veel bergende gronden (mariene klei oldambt), diepe drainage, ondiep wortelende gewassen, kleischeuren etc. bereikt het zout de wortelzone niet.
- In dit rapport is verzilting op zichzelf beschouwd. Omdat de geschetste extremen in droge situaties plaatsvinden rest de vraag of de schade door droogte in een dergelijke situatie niet groter is. Bij percelen met hoge kwelniveaus speelt dit minder dan bij lage kwelniveaus, omdat bij hoge kwelniveaus de grondwaterstand niet zo sterk daalt in droge periodes.
- Berekening is niet beschouwd vanwege het voor het grootste deel van Noord-Nederland geldende verbod (aardappelen, bruinrot). In hoeverre berekening effect heeft op het chlorideprofiel in de onverzadigde zone is niet bekend.
- Het is moeilijk vast te stellen of de gewassen daadwerkelijk schade ondervinden van de blootstelling aan enig zout. De processen zijn nog uiterst slecht begrepen.
- Mogelijk is verslemping van de grond door het binden van natrium schadelijker dan het effect van chloride op de plant. Als dit optreedt zullen weinigen het aan optredende verzilting wijten.

6.5.3 Aanbevelingen

Een aantal van de onzekerheden uit de vorige paragraaf kunnen worden ondervangen door aanvullend onderzoek. Het meest van belang zijn:

- Het doen van aanvullend veldwerk aan de onverzadigde zone voor het toetsen van de getallen in tabellen 6.2 en 6.3. Deze getallen zijn in Nederland nog nooit door veldwerk vastgelegd. Er bestaan slechts theoretische tabellen.
- Het verbeteren van de onderleggers van de verziltingskaart door:
 1. Het regionaal model te ijken op fluxen
 2. Een berekening te doen om de toename van kwel te bepalen voor de toekomstige situatie(s) met bodemdaling en zeespiegelstijging.

7 REFERENTIES

- Archie, G.E. (1942). *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Petroleum Transactions of AIME 146: 54–62.
- Dahlin, T. (1993). *On the automation of 2D resistivity surveying for engineering an environmental applications*, PhD thesis
- De Vries, J.J. (1974). *Groundwater flow systems and stream nets in the Netherlands*. Ph.D. thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam
- De Zeeuw J.W., Hellinga F. (1958). *Neerslag en afvoer*. Landbouwkundig Tijdschrift 70: 405–422
- Drabbe, J. & Badon Ghijben, W. (1889). *Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam*. Tijdschrift Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Verhandelingen 1888/1889: 8–22.
- Engelen, G.B. (1981). An analysis of regional hydrological systems from early Pleistocene to Recent in the Western part of the Netherlands as a basis for geological calculations. St.P.A.V.Gez. Techn.: Mod.Rekenmeth.'81-'82, Delft.
- Engelen, G.B., and F.H. Kloosterman (1996). *Hydrological System Analysis, Methods and Applications*. TNO, Institute of Applied Geoscience. Water Science and Technology Library, Vol. 20.
- Ernst, L.F. (1978). *Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables*. *Journal of Hydrology*, 39: 1-50
- Freeze, R.A., Whitherspoon, P.A. (1967). *Theoretical analysis of regional groundwater flow 2. The effect of water-table configurations and subsurface permeability variation*. *Water Resour. Res.* 3, 623–634.
- Griede, J.W. and Roeleveld, W. (1982). *De geologische en paleogeografische ontwikkeling van het noordelijk zeekele gebied*. *Geogr. Tijdschr.*, K. Ned. Aardr. Genoot. 16, pp. 439–455.
- Herzberg, A. (1901). *Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder*. *Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung* 44: 815–819; 842–844
- Hooghoudt, S.B. (1940). *Algemene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen*. No. 7 in de serie: Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond. Bodemkundig Instituut te Groningen
- Immerzeel, C.H. van, Vegter, U. en P.P. Schot (1996) *Toepassing van een neerslaglenzenmodel bij hydro-ecologische herstelprojecten*; in: H₂O, jrg 26, nr 10, pag 293-296.
- IWACO B.V. (1994) *De berekening van het gedrag van neerslaglenzen met behulp van een waterbalansmodel*; IWACO B.V. Vestiging Noord, Groningen.
- Jorgensen (1989). *Using Geophysical Logs to Estimate Porosity, Water Resistivity, and Intrinsic Permeability*, USGS Water Supply Paper 2321.
- Kraijenhoff van de Leur D.A. (1958): *A study of nonsteady groundwater flow with a special reference to a reservoir coefficient. I*. *De Ingenieur* 70: B87–94

- Kroes, J.G. Wesseling, J.G., Van Dam, J.C. (2000). Integrated modelling of the soil–water–atmosphere–plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application. *Hydrological Processes* 14, 1993-2002 (2000)
- Langevin, C.D., Thorne, D., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, W. 2008. *SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods: Book 6, Chapter A22, 39 p.
- Lenderink, G. (2006). *KNMI'06 scenarios: interpolation to monthly changes*. Notitie KNMI.
- Poot, A. & P.P. Schot (2000). *Neerslaglenzen: vorm en dynamiek*. *Stromingen, Vakblad van de Nederlandse Hydrologische Vereniging* 6 (4): 13-26.
- Raat, G.A. de (1999) *Neerslaglenzen in kwelgebieden*; Kiwa-rapport SWI 99.157, Nieuwegein.
- Roeleveld, W. (1974). *The Groningen Coastal Area. A Study in Holocene Geology and Low-land Physical Geography*. PhD Thesis, Amsterdam
- Schot, P.P., Dekker, S.C., Poot, A. (2004). *The dynamic form of rainwater lenses in drained fens*. *Journal of Hydrology* 293 (2004) 74–84
- Snepvangers, J.J.J.C. en W.L. Berendrecht (2007), *MIPWA – Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer*. TNO rapport 2007-U-R0972/A. TNO, Utrecht.
- Tóth, J. (1963). *A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins*. *J. Geophys. Res.* 68, 4795–4812.
- Van Dam, J.C. (2000). *Simulation of field-scale water flow and bromide transport in a cracked clay soil*. *Hydrological Processes* 14, 1101-1117 (2000)
- Van Hoorn, J.W. (1984). *Salt transport in heavy clay soil*. In: J.Bouma and P.A.C. Raats (Eds): *Proc. of the ISSS Symp. On water and solute movement in heavy clay soils*. 229-240.
- Wal, B.J. van der, 2001. *Neerslaglenzen : sterke ruimtelijke variatie*. *Stromingen, Vakblad van de Nederlandse Hydrologische Vereniging* 7(3): 17 – 24
- Velstra, J en Voorde, M ter (eds.) (2009). *Overzicht huidige kennis omtrent interne verzilting in Nederland*. Acacia Water en Stowa. STOWA-uitgave 2009-45.
- Volker, A. (1962). *Geo-electrisch onderzoek, Noord-Holland*. Rijkswaterstaat – Dienst voor de waterhuishouding. Tekstdocument met 7 bijlagen.

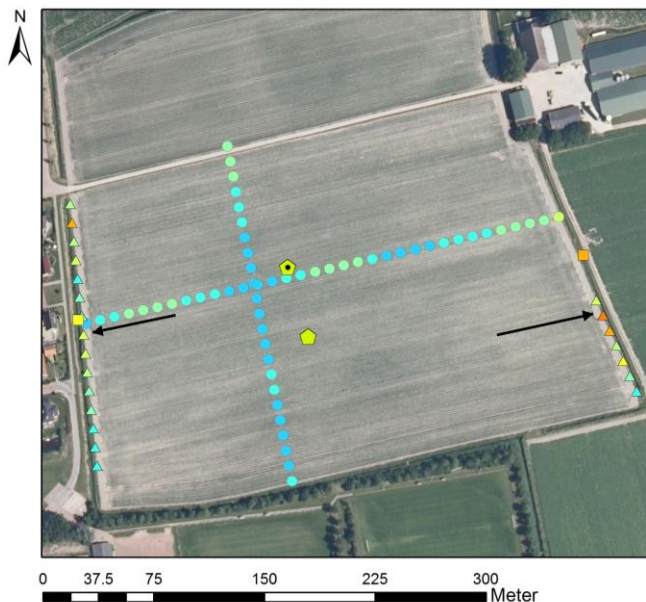
Bijlage 1. CVES-metingen: factsheets

Sexbierum

Locatie	Sexbierum
Eigenaar	F. Jukema
Perceelnummer	1

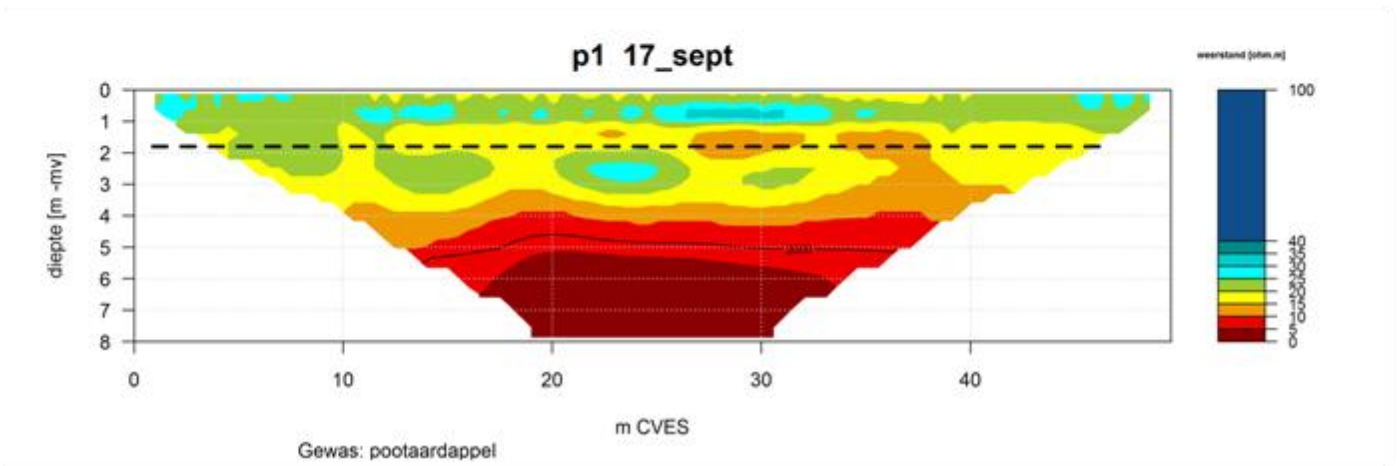
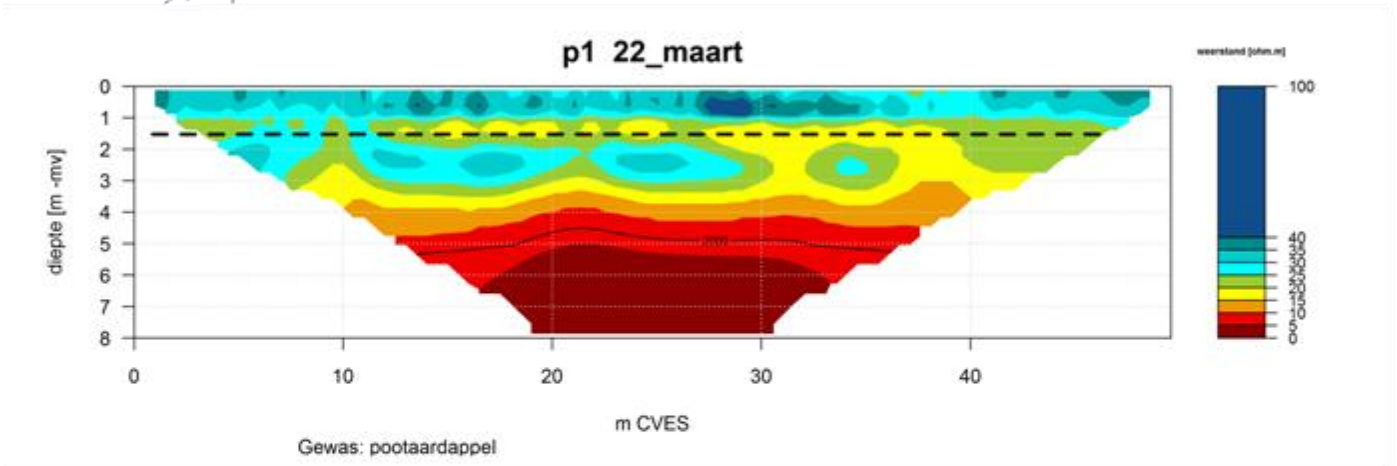


Bodemtype	Bodemkaart	bgMn15C-Vb
Bodemsoort	Bodemkaart	lichte zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	pootaardappel
Drainafstand (m)	Gemeten	12-13
Draindiepte (m)	Gemeten	onbekend
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.5 tot -1.8
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.08
Formatiefactor	Berekend	4.7
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-4.9
Dikte Deklaag (m)	Dinoloet	2.8
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.1



Legenda

symbolen	Chloridegehaltes [mg/l]
△ drainwater	■ geen waarde
□ oppervlaktewater	■ 1 - 200
→ drainrichting	■ 200 - 300
CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]	■ 300 - 400
● 0.0-1.0	■ 400 - 500
● 1.0 - 3.0	■ 500 - 600
● 3.0 - 4.5	■ 600 - 700
● 4.5 - 6.0	■ 700 - 800
● 6.0 - 7.5	■ 800 - 900
● 7.5 - 10.0	■ 900 - 1000
● begin CVES [0 meter]	■ 1000 - 1250
EM34, geleidbaarheid [mmho/m]	■ 1250 - 1500
● 20 - 30	■ 1500 - 2000
● 30 - 40	■ 2000 - 5000
● 40 - 50	■ > 5000
● 50 - 60	
● 60 - 70	
● 70 - 80	
● 80 - 90	
● 90 - 100	
● 100 - 125	
● 125 - 150	
● > 150	

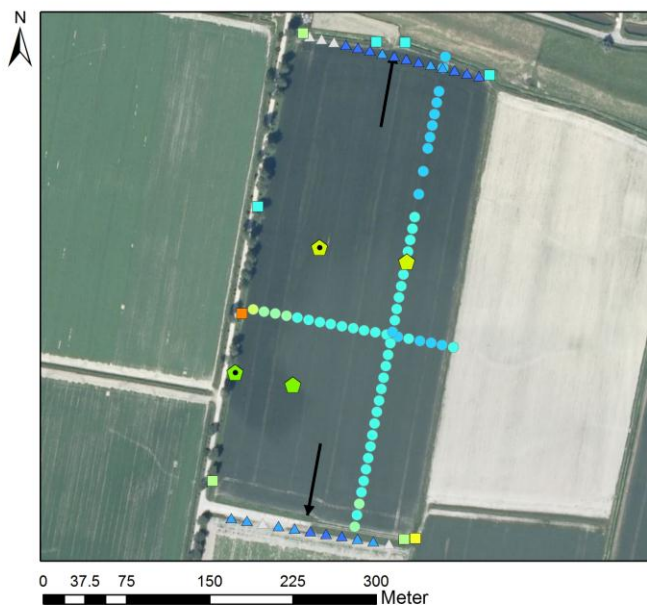


Den Andel

Locatie	Den Andel
Eigenaar	R. Clevering
Perceelnummer	2



Bodemtype	Bodemkaart	Mn15A-VI
Bodemsoort	Bodemkaart	lichte zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	wintertarwe
Drainafstand (m)	Gemeten	7-10
Draindiepte (m)	Gemeten	onbekend
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.5 tot -2.3
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.22
Formatiefactor	Berekend	3.8
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-4.3
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	4.0
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-0.7



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0

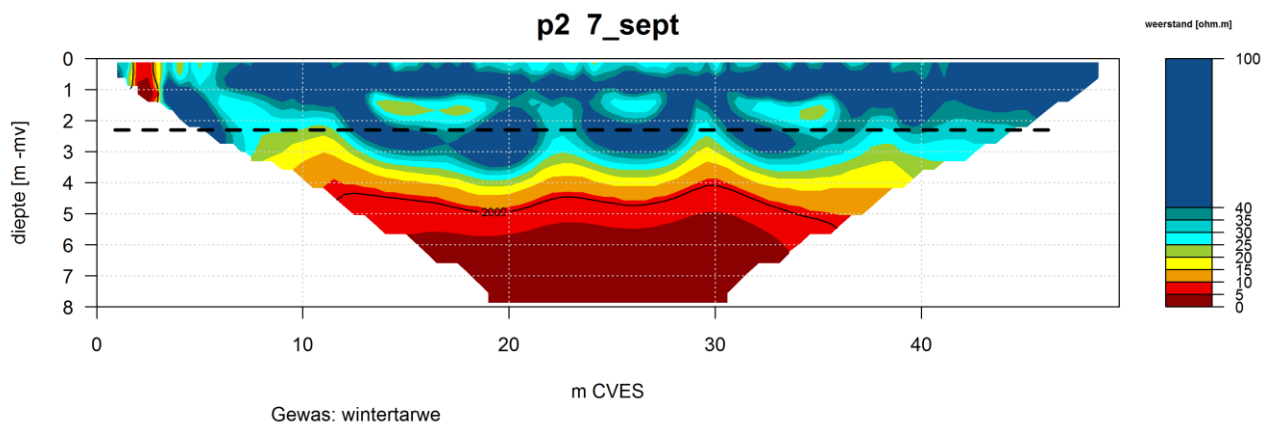
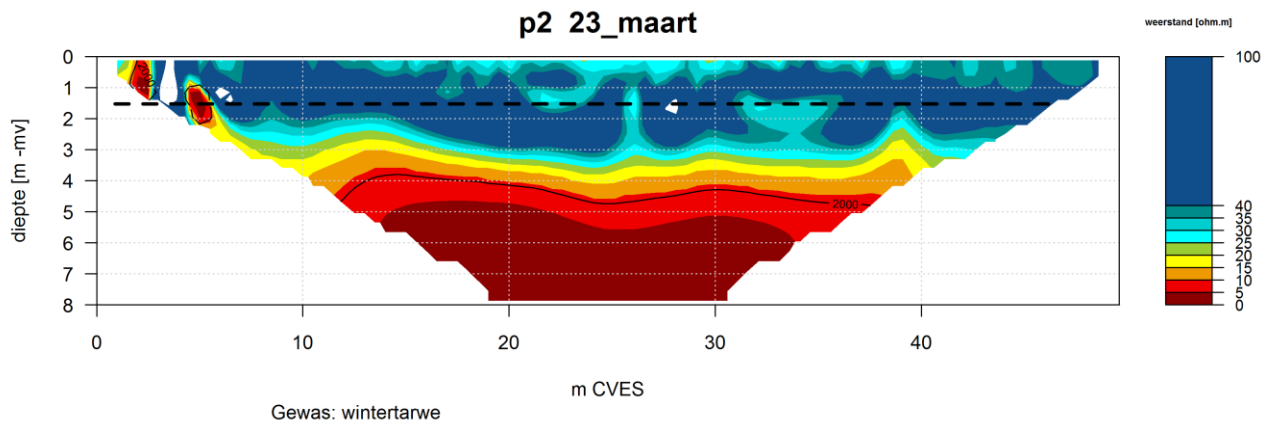
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

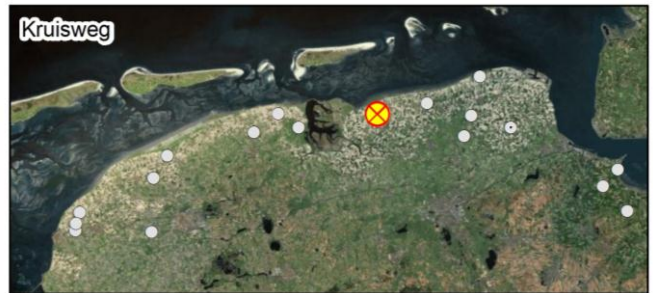
Chloridegehalten [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

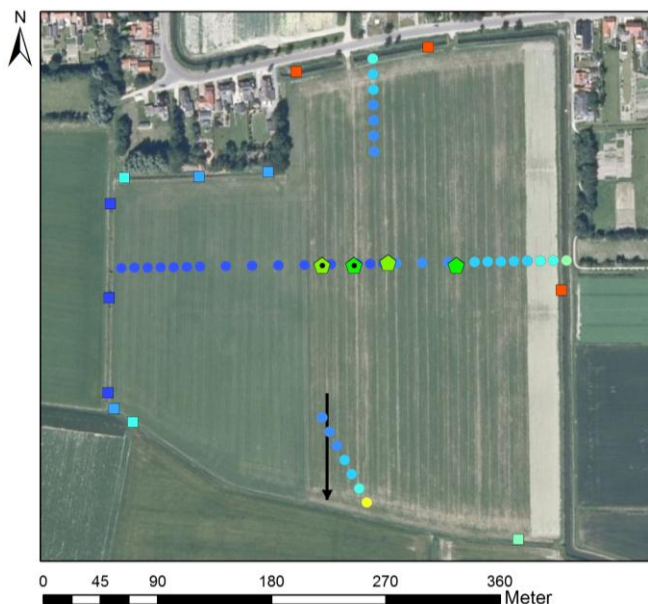


Kruisweg

Locatie	Kruisweg
Eigenaar	H. Westers
Perceelnummer	3



Bodemtype	Bodemkaart	Mn15C-VII
Bodemsoort	Bodemkaart	lichte zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	rogge + groenbemester
Drainafstand (m)	Gemeten	10-15
Draindiepte (m)	Gemeten	onbekend
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.5 tot -1.9
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.15
Formatiefactor	Berekend	3.9
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-6.5
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	2.5
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-0.9



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

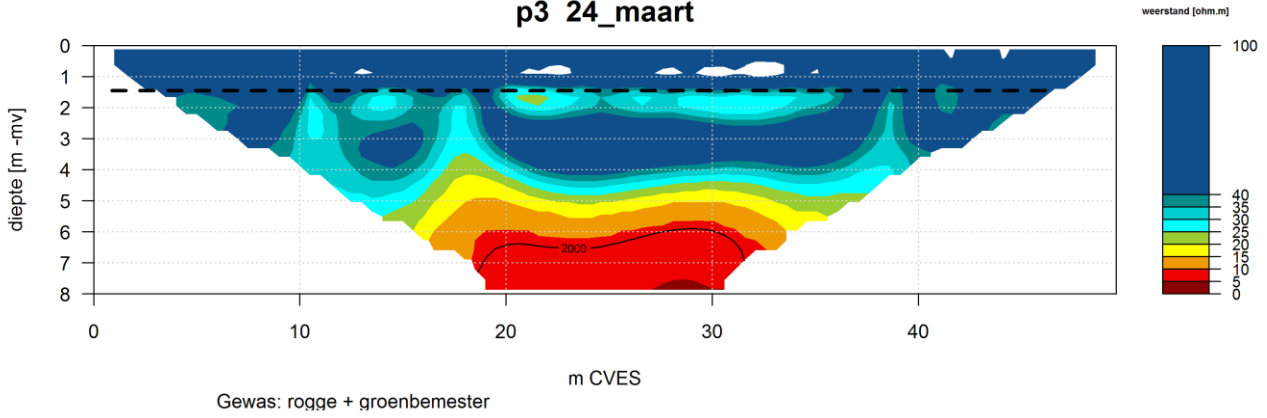
EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

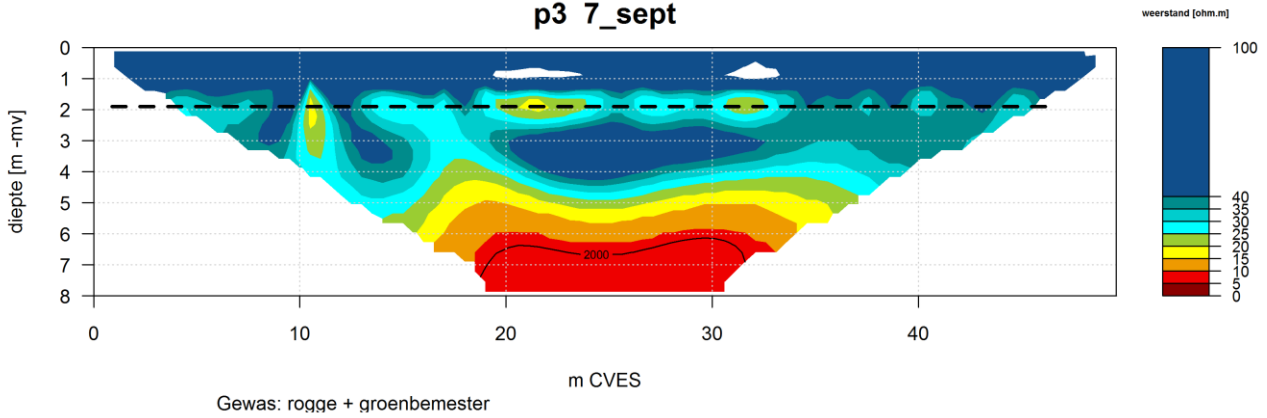
Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

p3 24_maart



p3 7_sept

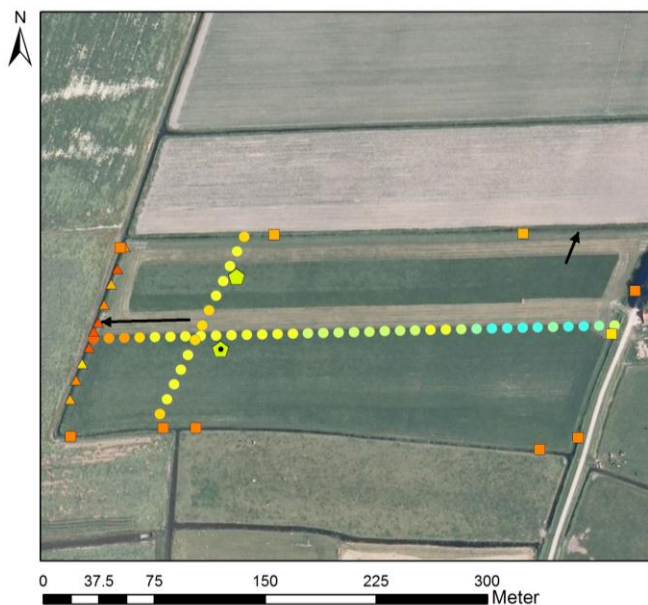


Herbaijum

Locatie	Herbaijum
Eigenaar	A. Hofstra
Perceelnummer	4



Bodemtype	Bodemkaart	gMn25C-V
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	gras
Drainafstand (m)	Gemeten	8-10
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.4
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-0.9 tot -1.7
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.09
Formatiefactor	Berekend	3.1
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-4
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	2.8
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.2



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

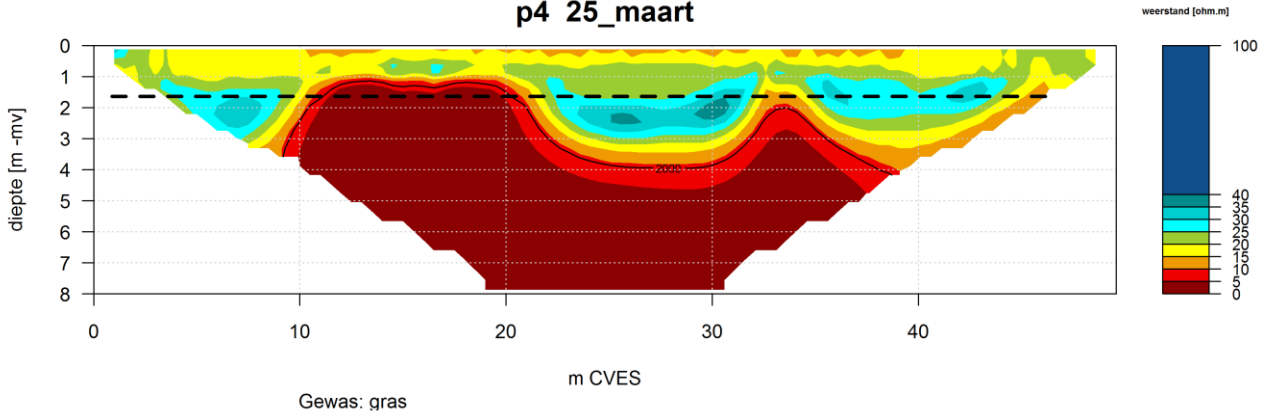
EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

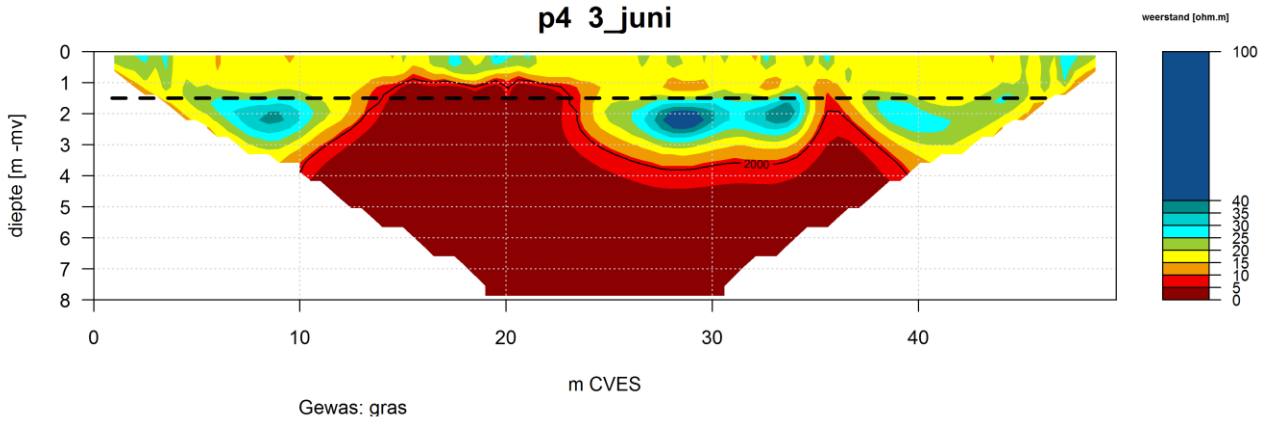
Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

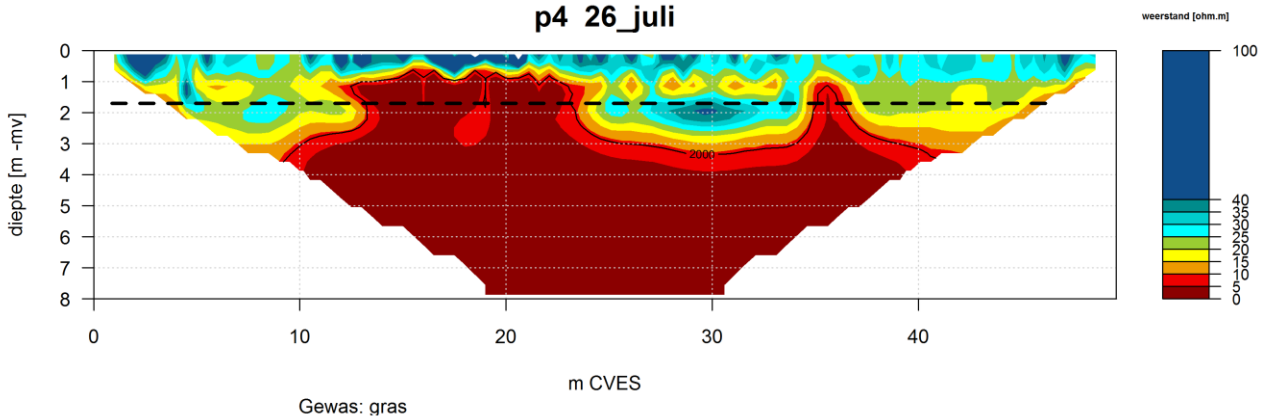
p4 25_maart



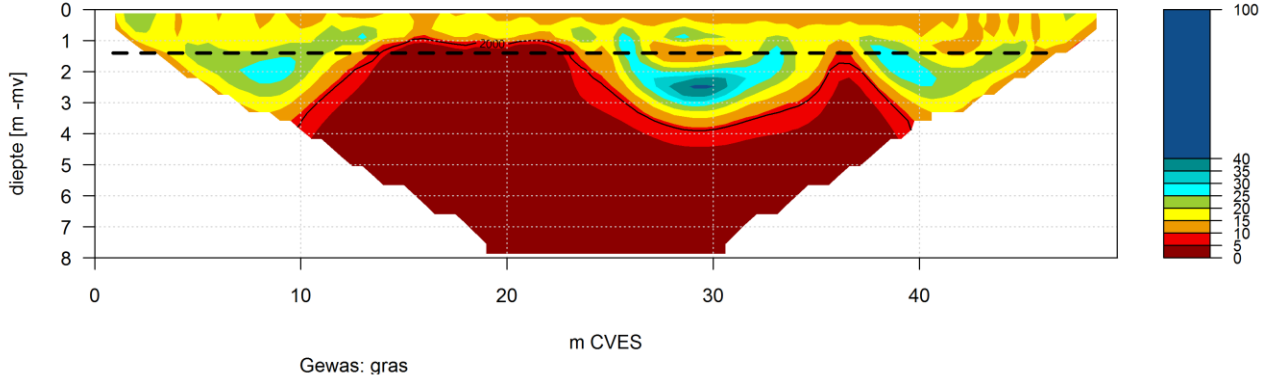
p4 3_juni



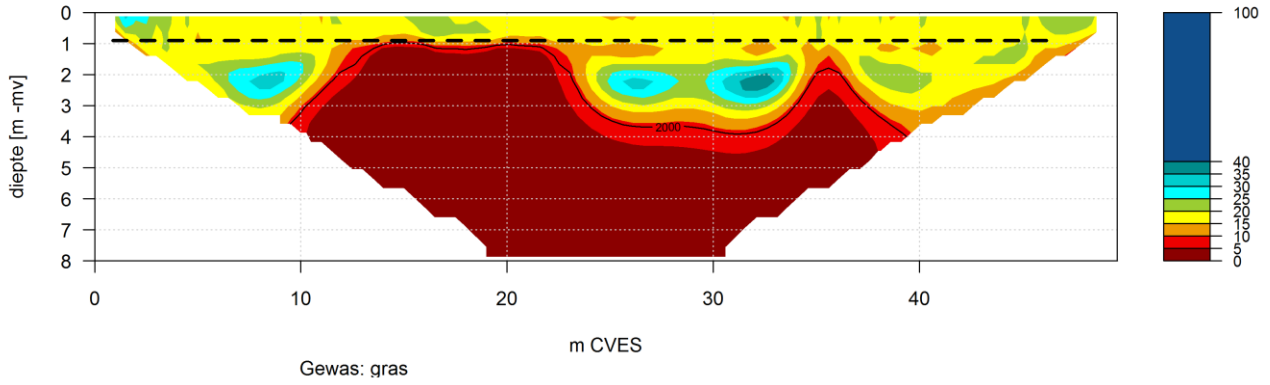
p4 26_juli



p4 17_sept



p4 17_nov

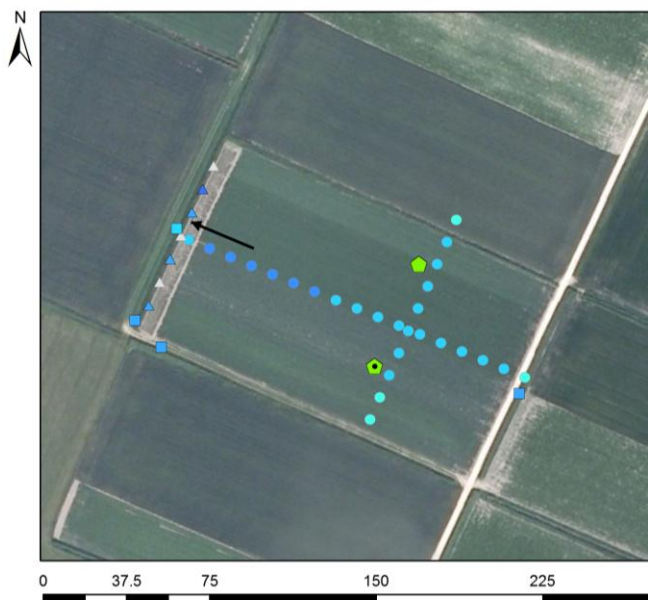


Nieuwe Bildtzijl

Locatie	Koedijk Nieuwe Bildtzijl
Eigenaar	Polstra
Perceelnummer	5



Bodemtype	Bodemkaart	Mn25A-Vb
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	wintertarwe
Drainafstand (m)	Gemeten	12
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.1
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.3 tot -2.0
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.25
Formatiefactor	Berekend	4.6
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-6
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	1.4
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	0.0



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

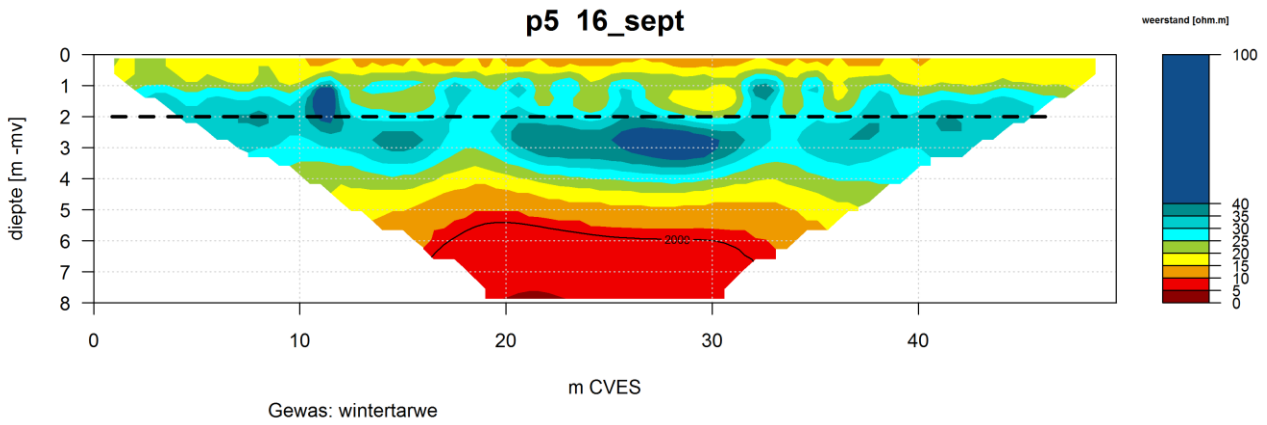
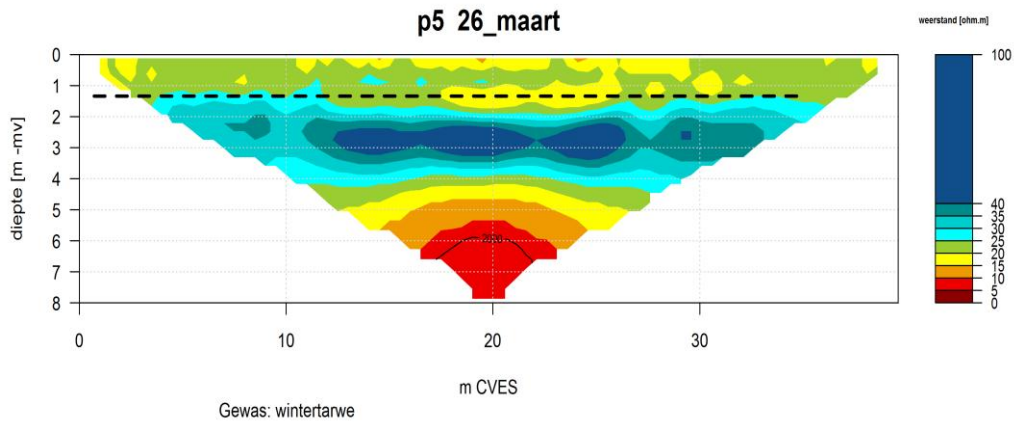
- 0.0 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltes [mg/l]

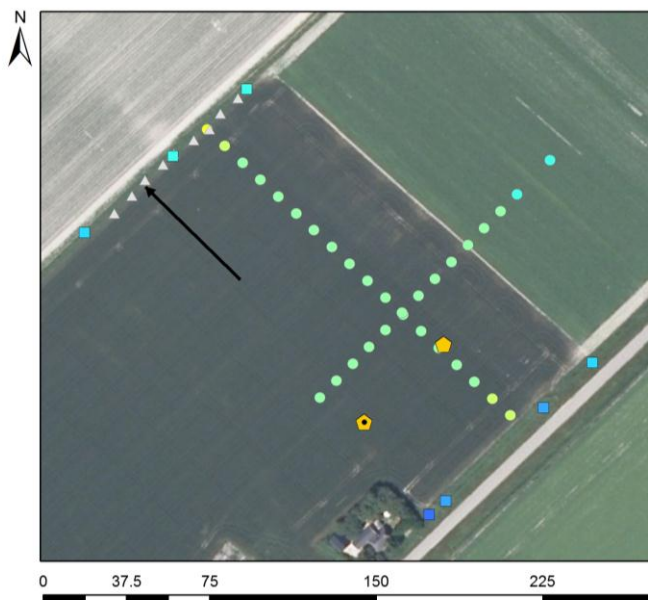
- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000



Locatie	Oosternijkerk
Eigenaar	J. Hoekstra
Perceelnummer	6



Bodemtype	Bodemkaart	bMn15A-VI
Bodemsoort	Bodemkaart	lichte zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	suikerbieten
Drainafstand (m)	Gemeten	9-10
Draindiepte (m)	Gemeten	onbekend
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.04
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.27
Formatiefactor	Berekend	3.4
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-4
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	3.0
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-0.4



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

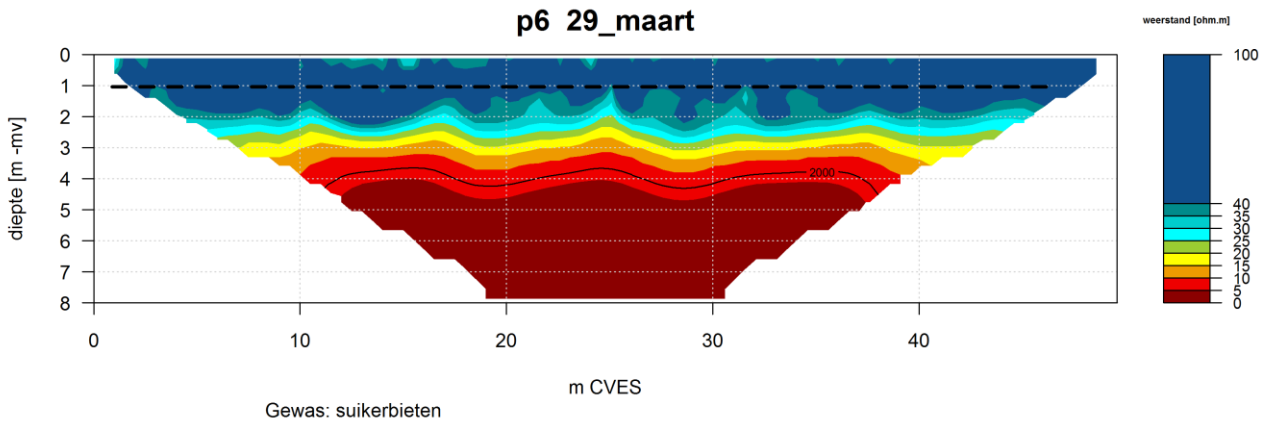
- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

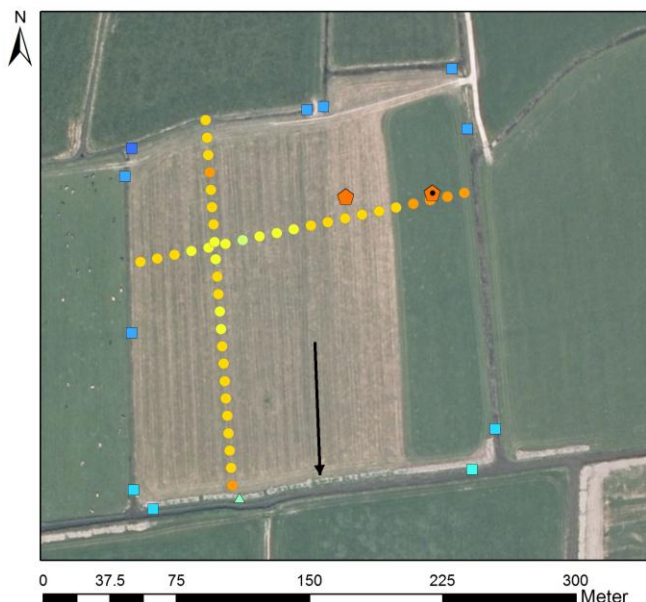


Hantummerburen

Locatie	Hantummerburen
Eigenaar	S. Postumus
Perceelnummer	7

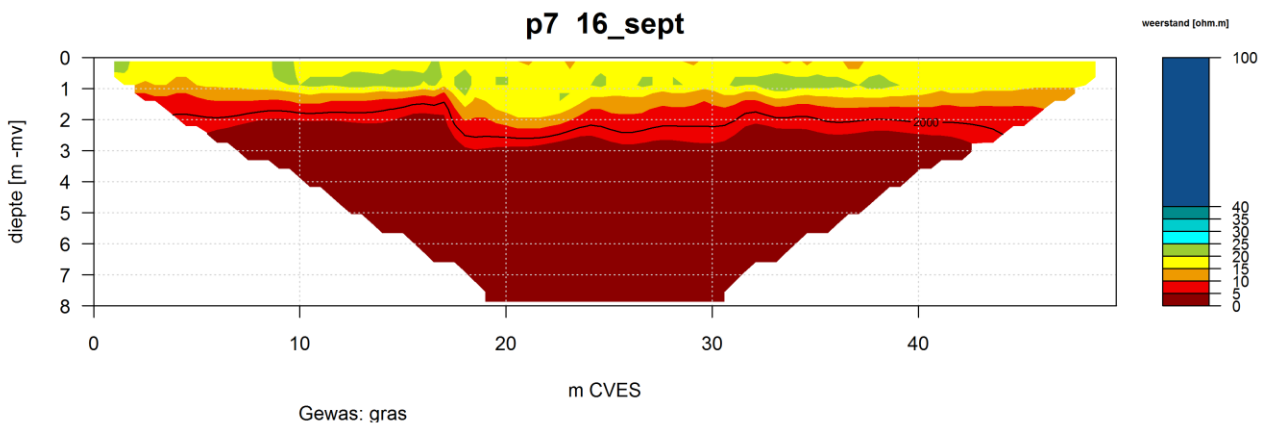
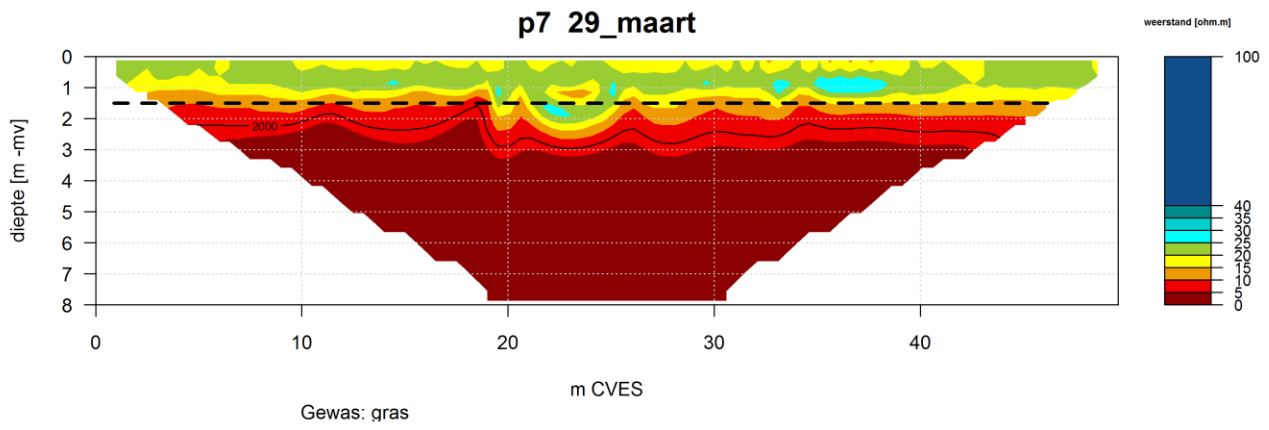


Bodemtype	Bodemkaart	gMn83C-V
Bodemsoort	Bodemkaart	knip
Gewas in 2010	Eigenaar	gras
Drainafstand (m)	Gemeten	10-12
Draindiepte (m)	Gemeten	-0.8 tot -0.9
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.5
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.32
Formatiefactor	Berekend	3.0
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-2.7
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	3.4
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-0.9



Legenda

symbolen	Chloridegehaltes [mg/l]
△ drainwater	■ geen waarde
□ oppervlaktewater	■ 1 - 200
→ drainrichting	■ 200 - 300
CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]	■ 300 - 400
● 0.0-1.0	■ 400 - 500
● 1.0 - 3.0	■ 500 - 600
● 3.0 - 4.5	■ 600 - 700
● 4.5 - 6.0	■ 700 - 800
● 6.0 - 7.5	■ 800 - 900
● 7.5 - 10.0	■ 900 - 1000
● begin CVES [0 meter]	■ 1000 - 1250
EM34, geleidbaarheid [mmho/m]	■ 1250 - 1500
● 20 - 30	■ 1500 - 2000
● 30 - 40	■ 2000 - 5000
● 40 - 50	■ > 5000
● 50 - 60	
● 60 - 70	
● 70 - 80	
● 80 - 90	
● 90 - 100	
● 100 - 125	
● 125 - 150	
● > 150	

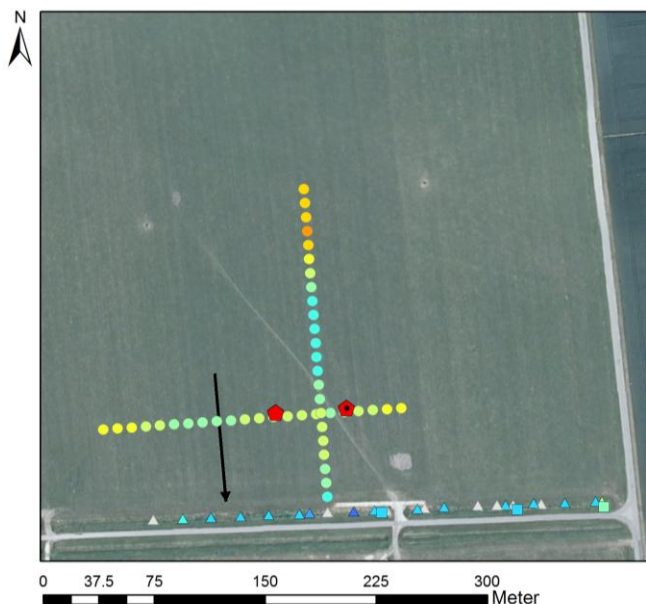


Finsterwolde

Locatie	Finsterwolde
Eigenaar	P. Prins
Perceelnummer	8



Bodemtype	Bodemkaart	Mn45A-Vb
Bodemsoort	Bodemkaart	zwarte klei
Gewas in 2010	Eigenaar	gras
Drainafstand (m)	Gemeten	8-14
Draindiepte (m)	Gemeten	-0.8
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.1
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	10
Formatiefactor	Berekend	3.0
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	< -7
Dikte Deklaag (m)	Dinoloet	10.1
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.7



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

- 0.0 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

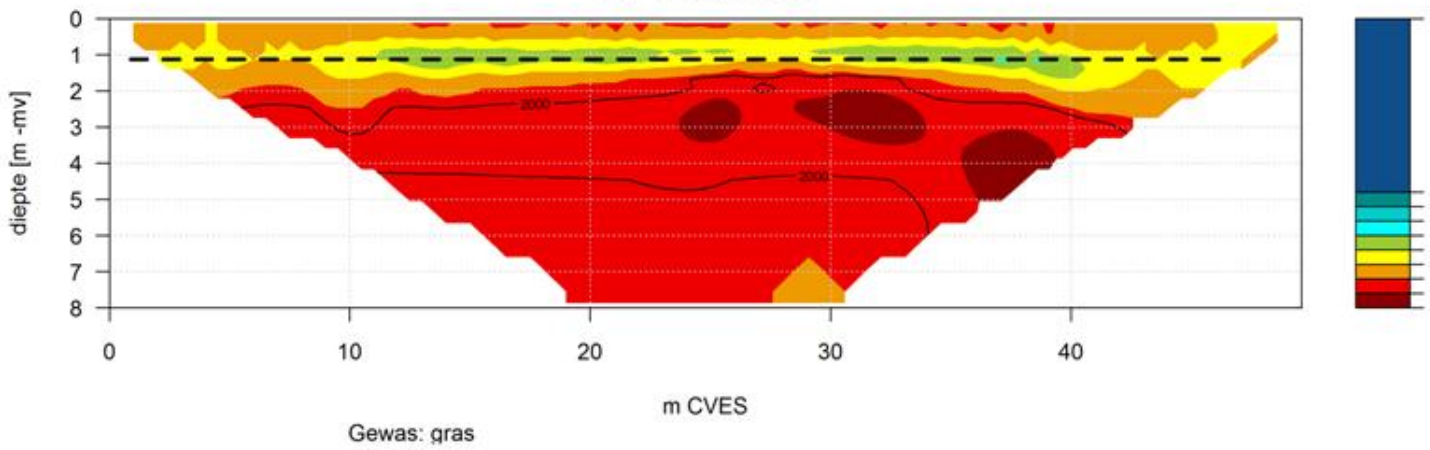
EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

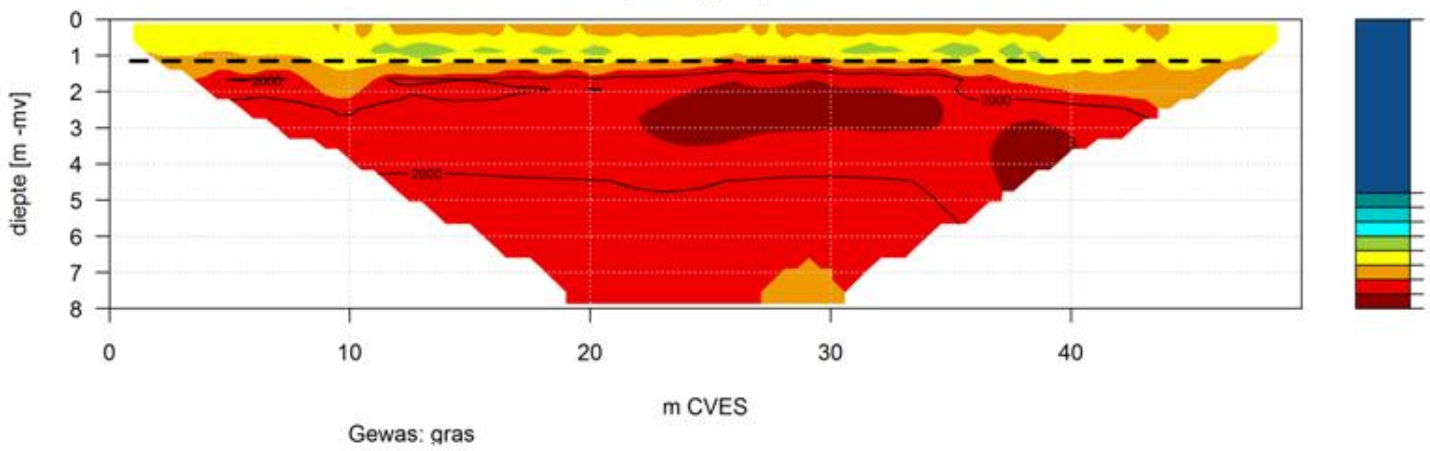
Chloridegehaltes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

p8 30_maart



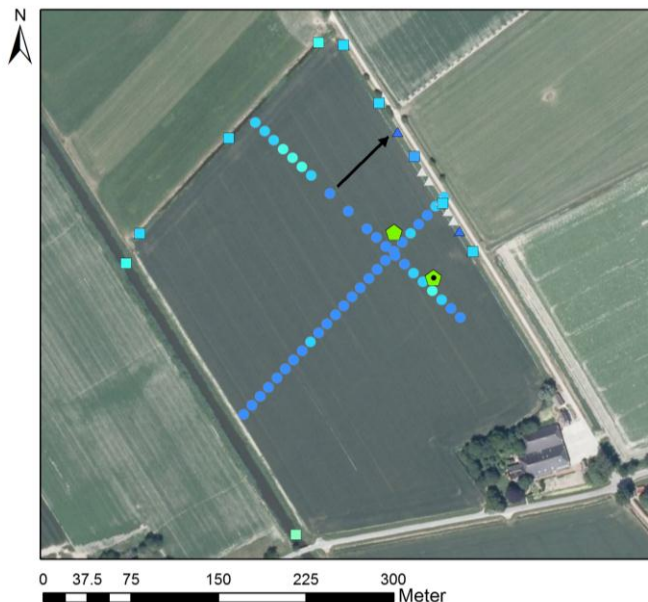
p8 8_sept



Locatie	Zeerijp
Eigenaar	M. Huizinga
Perceelnummer	9



Bodemtype	Bodemkaart	Mn25A-VI
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	suikerbieten
Drainafstand (m)	Gemeten	9-10
Draindiepte (m)	Gemeten	onbekend
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.6 tot -1.8
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.09
Formatiefactor	Berekend	2.4
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-5.3
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	1.5
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.3



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

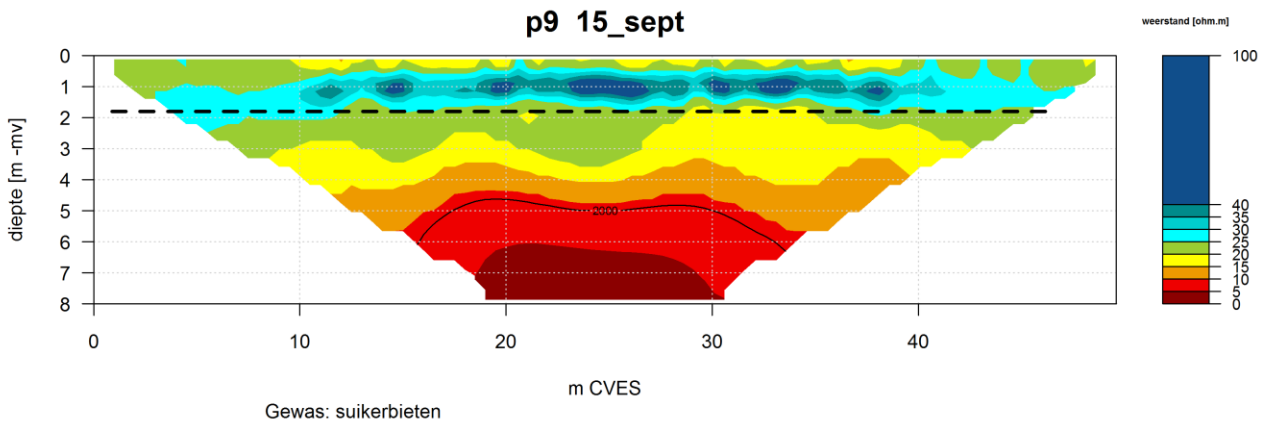
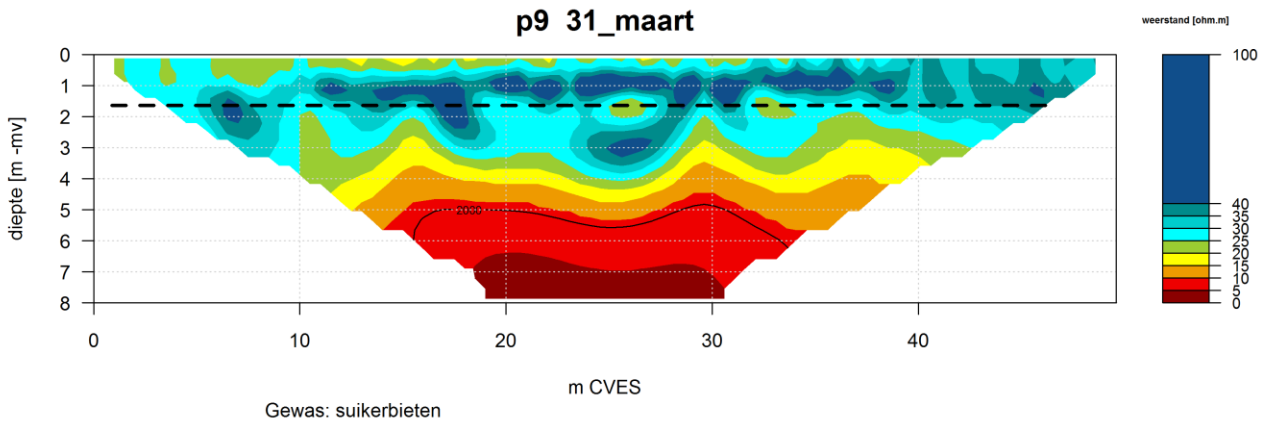
- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

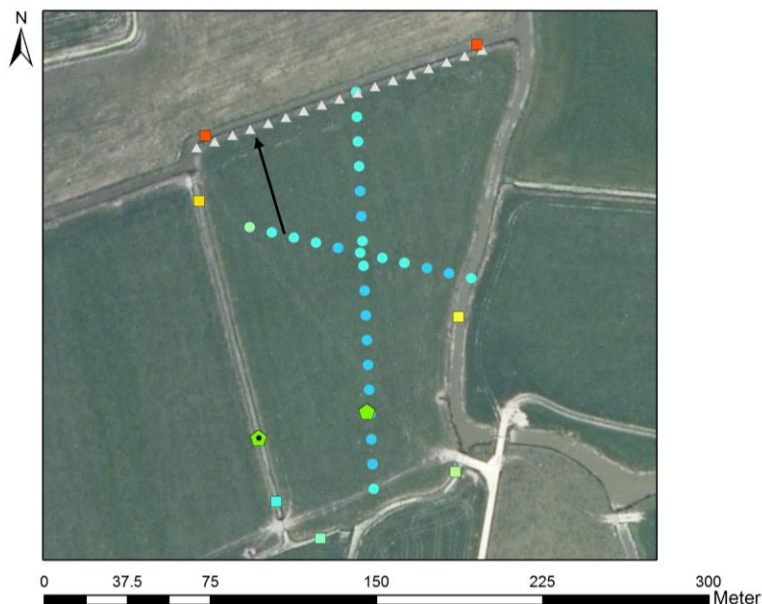


Middelstum

Locatie	Middelstum
Eigenaar	Bont
Perceelnummer	10



Bodemtype	Bodemkaart	kMn63C-V
Bodemsoort	Bodemkaart	knip
Gewas in 2010	Eigenaar	gras
Drainafstand (m)	Gemeten	6-8
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.5 tot -1.6
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.75 tot -2
Doorlatendheid bodem (K)	Gemeten	0.08
Formatiefactor	Berekend	2.3
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-5.7
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	3.5
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.6



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

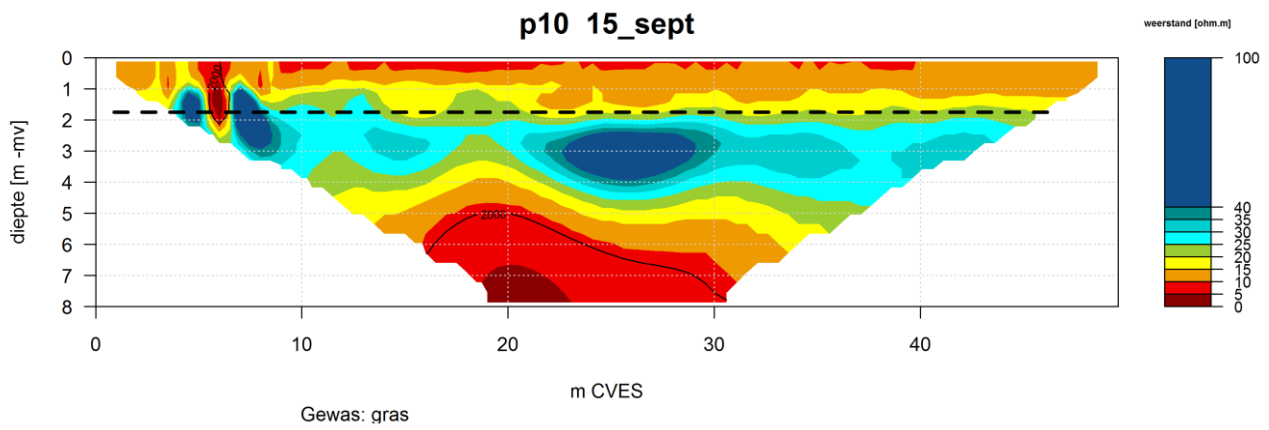
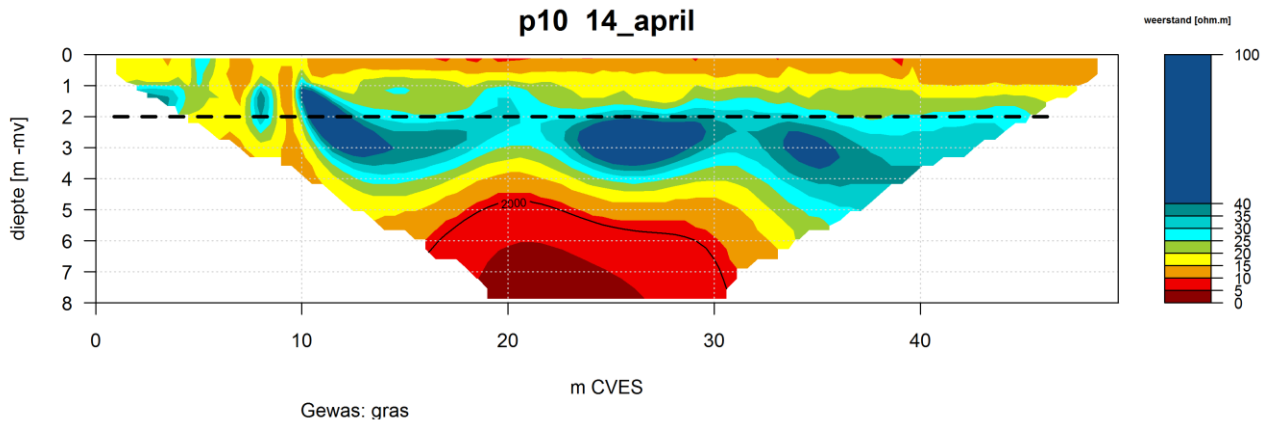
- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

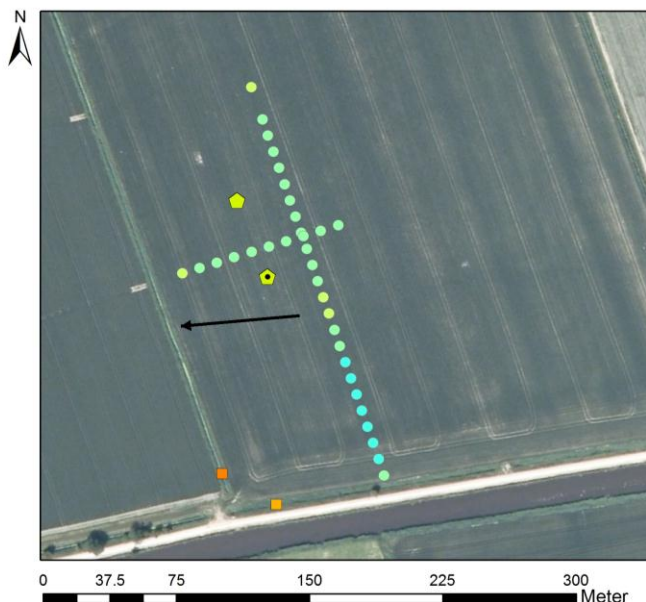
- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000



Locatie	Trekweg Rottum
Eigenaar	J. Boerma
Perceelnummer	11



Bodemtype	Bodemkaart	Mn25C-VI
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	wintertarwe
Drainafstand (m)	Gemeten	8-10
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.4 tot -1.6
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-0.8 tot -2.5
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	0.06
Formatiefactor	Berekend	4.4
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-3.9
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	3.9
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.2



Legenda

symbolen

- drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

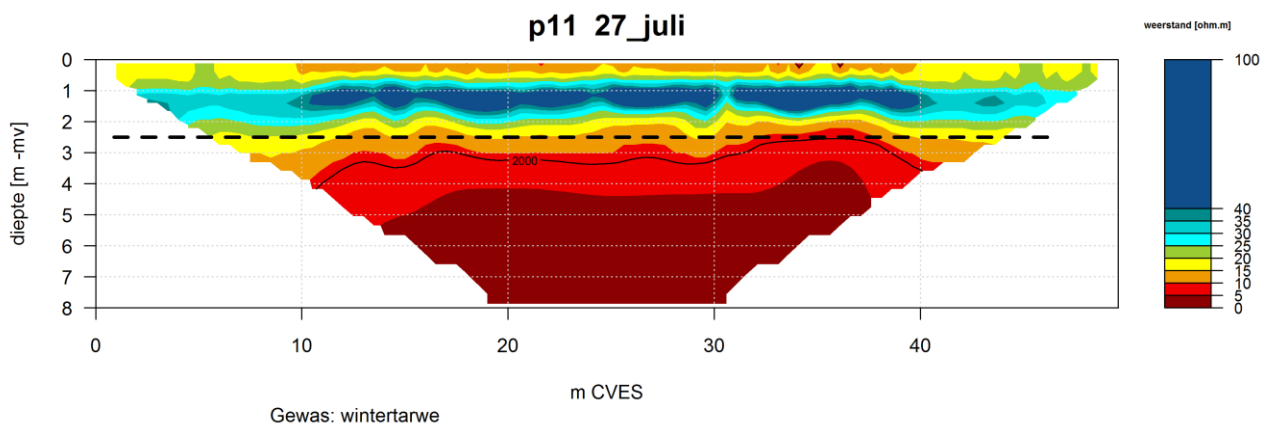
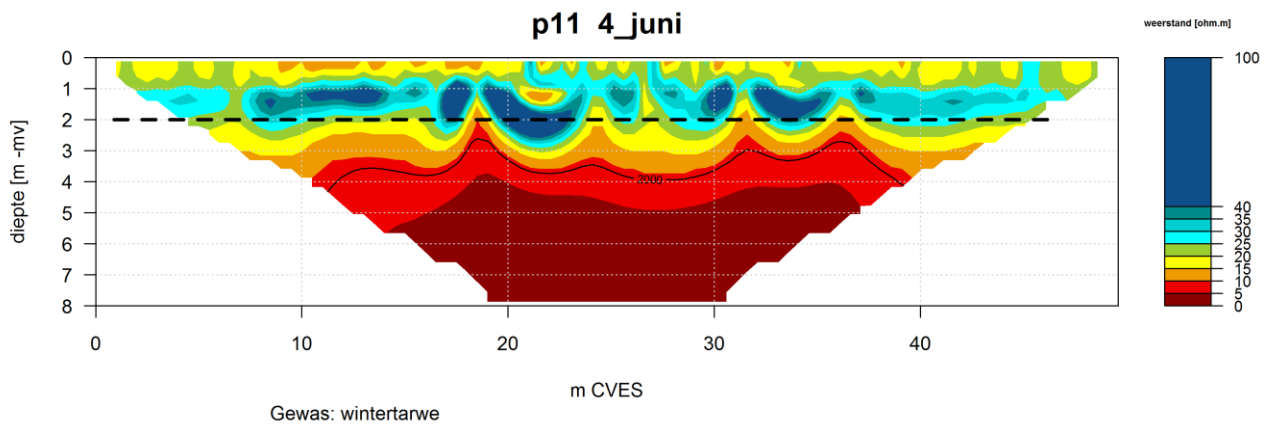
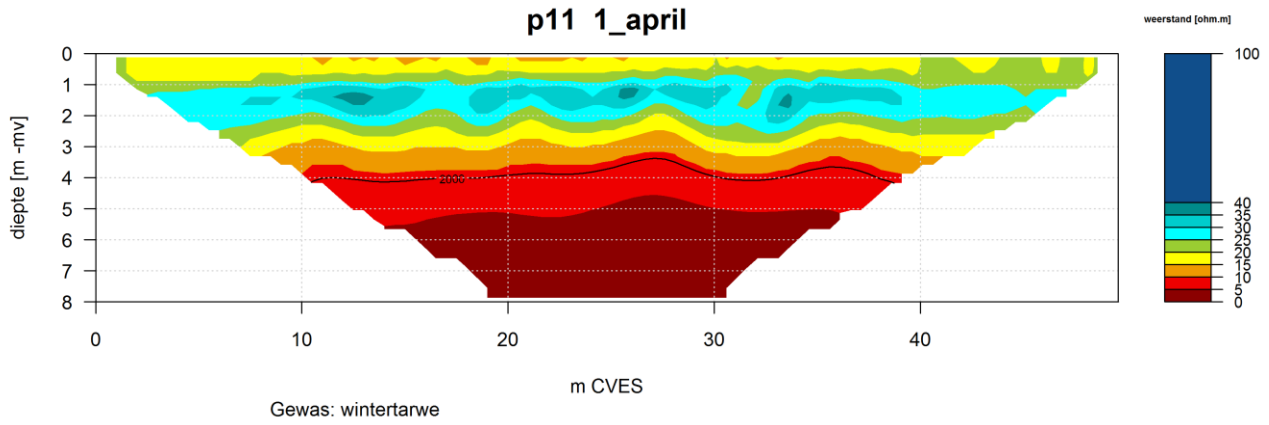
- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

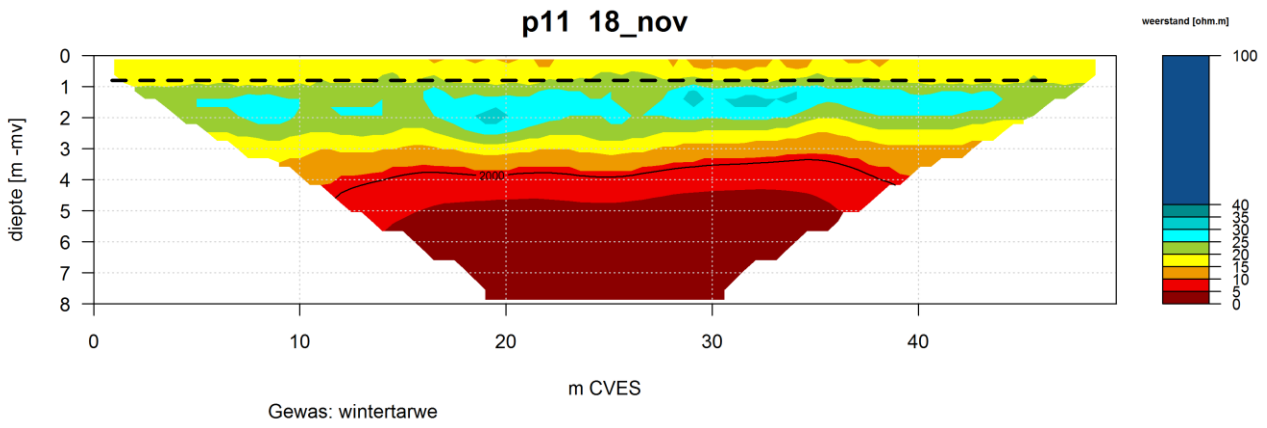
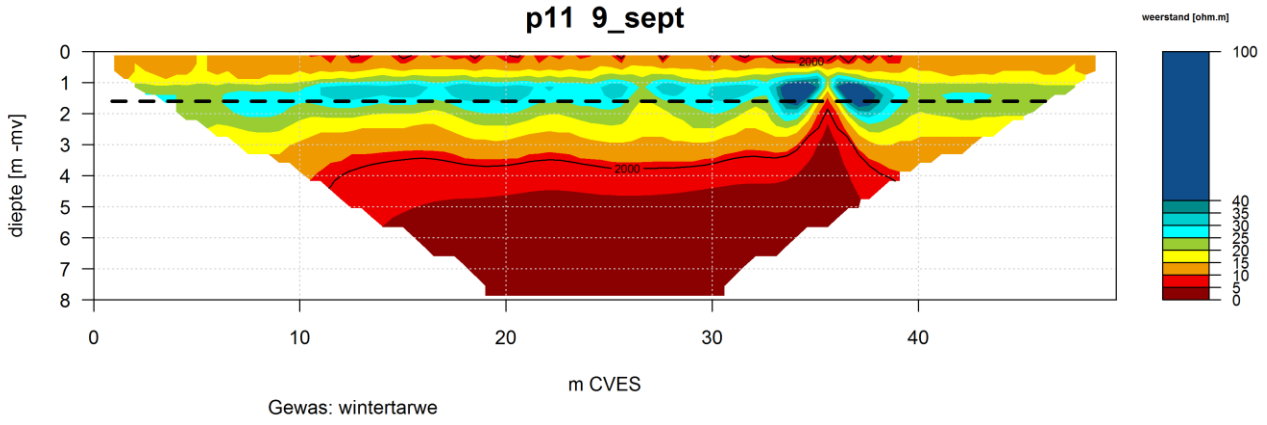
EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

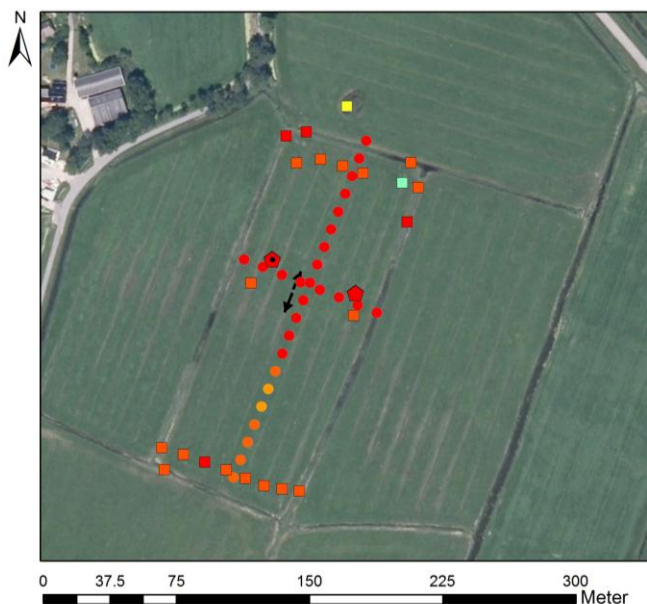




Locatie	Anjum
Eigenaar	H. Vlasma
Perceelnummer	12



Bodemtype	Bodemkaart	gMn85C-III
Bodemsoort	Bodemkaart	knip
Gewas in 2010	Eigenaar	gras
Drainafstand (m)	Gemeten	12
Draindiepte (m)	Gemeten	-0.35
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.1 tot -1.32
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	4
Formatiefactor	Berekend	0.7
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-0.5
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	6.0
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.5



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

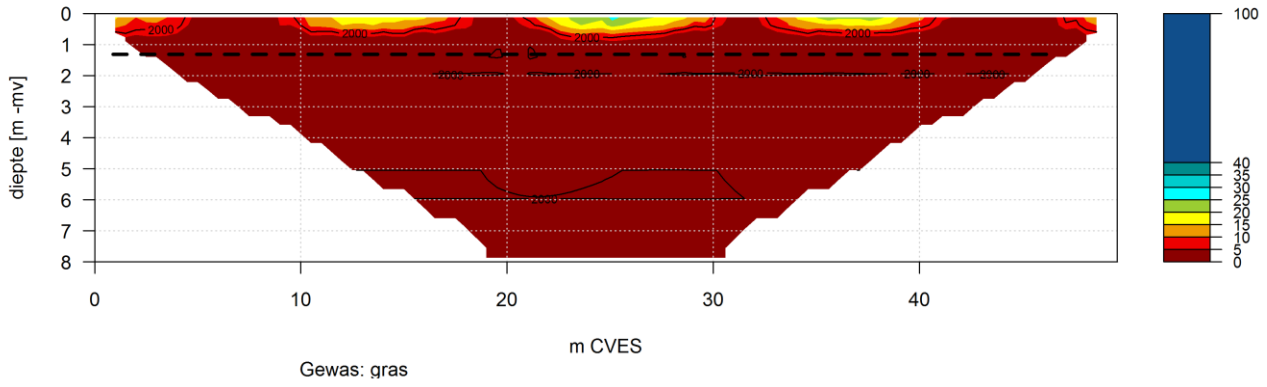
EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

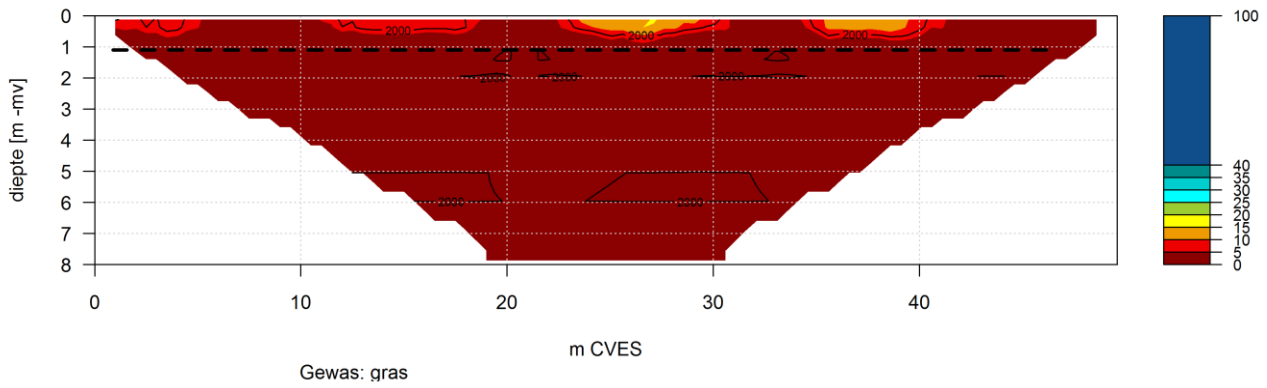
Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

p12 2_april



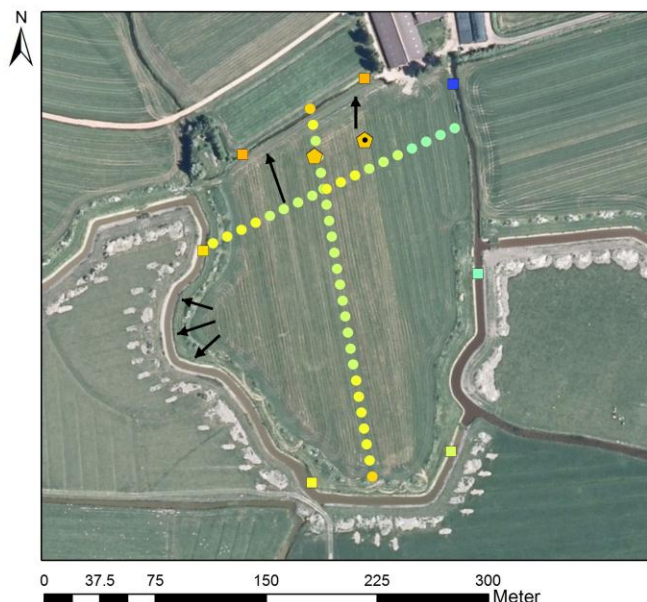
p12 6_sept



Locatie	Blessum
Eigenaar	Attema
Perceelnummer	13



Bodemtype	Bodemkaart	kMn48C-V
Bodemsoort	Bodemkaart	knip
Gewas in 2010	Eigenaar	gras
Drainafstand (m)	Gemeten	9-10
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.4
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.2
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	0.09
Formatiefactor	Berekend	3.0
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-3.1
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	3.2
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.3



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

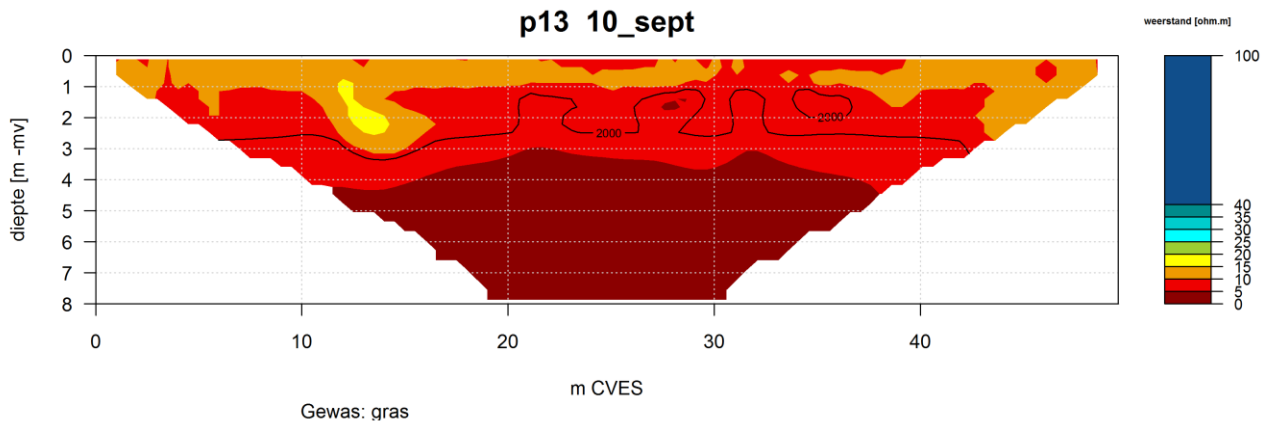
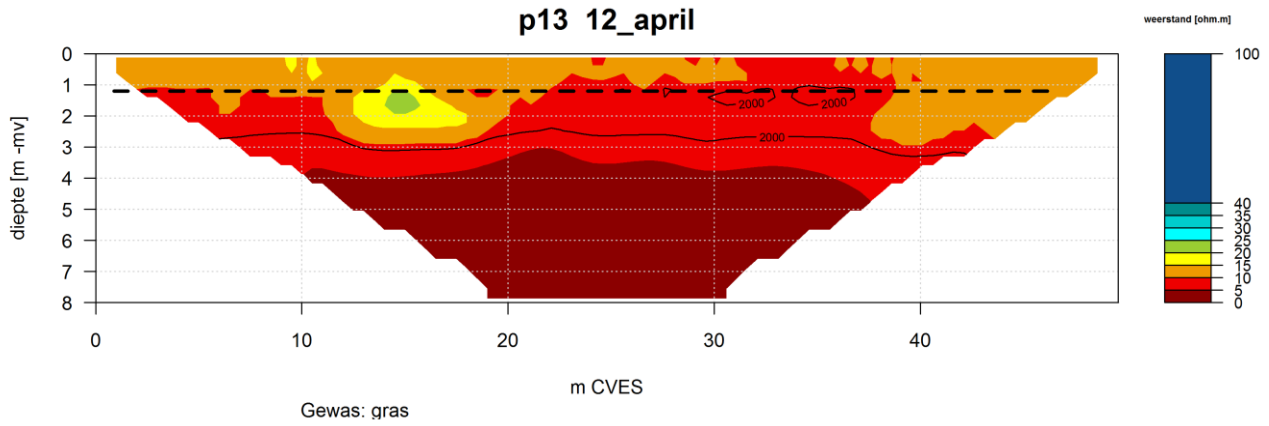
- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

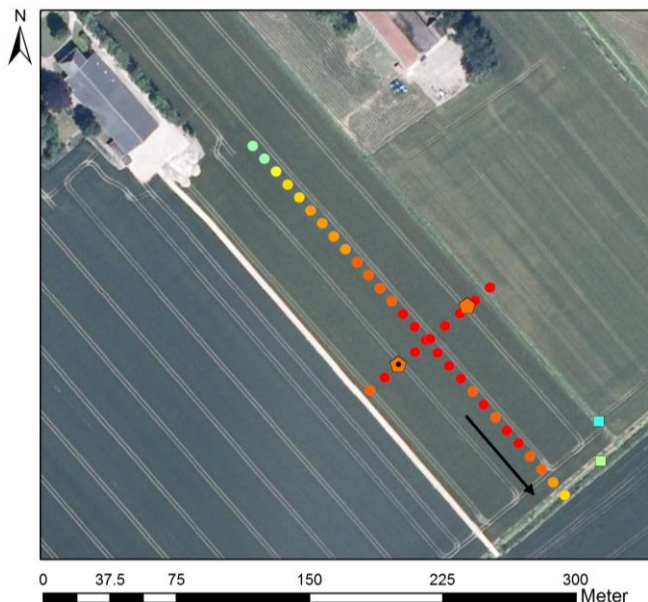
- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000



Locatie	Nieuwolda
Eigenaar	Ten Kate
Perceelnummer	14



Bodemtype	Bodemkaart	gMn83C-Vb
Bodemsoort	Bodemkaart	knip
Gewas in 2010	Eigenaar	wintertarwe
Drainafstand (m)	Gemeten	11-12
Draindiepte (m)	Gemeten	-0.6 tot -1.0
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.1 tot -1.2
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	4
Formatiefactor	Berekend	2.1
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-1
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	7.0
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.9



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

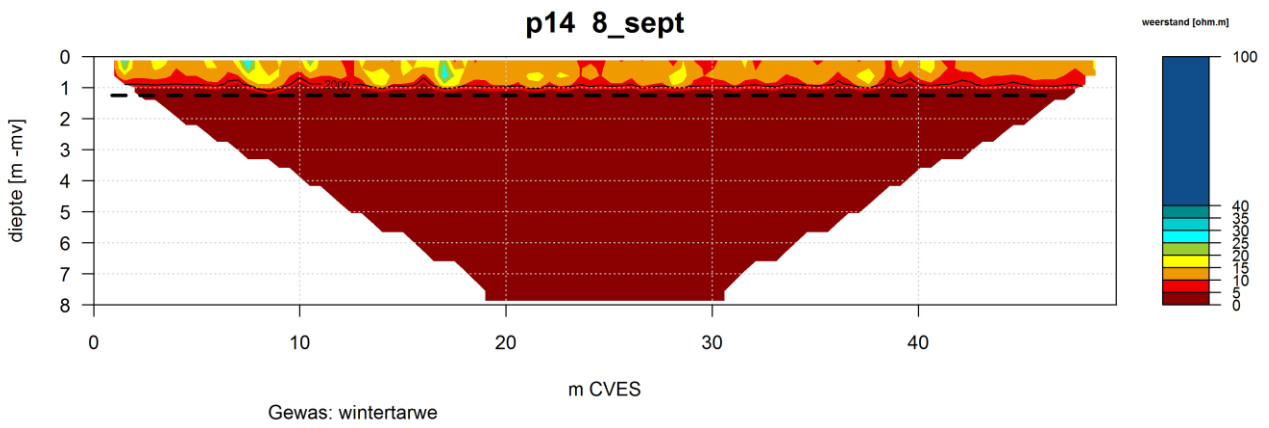
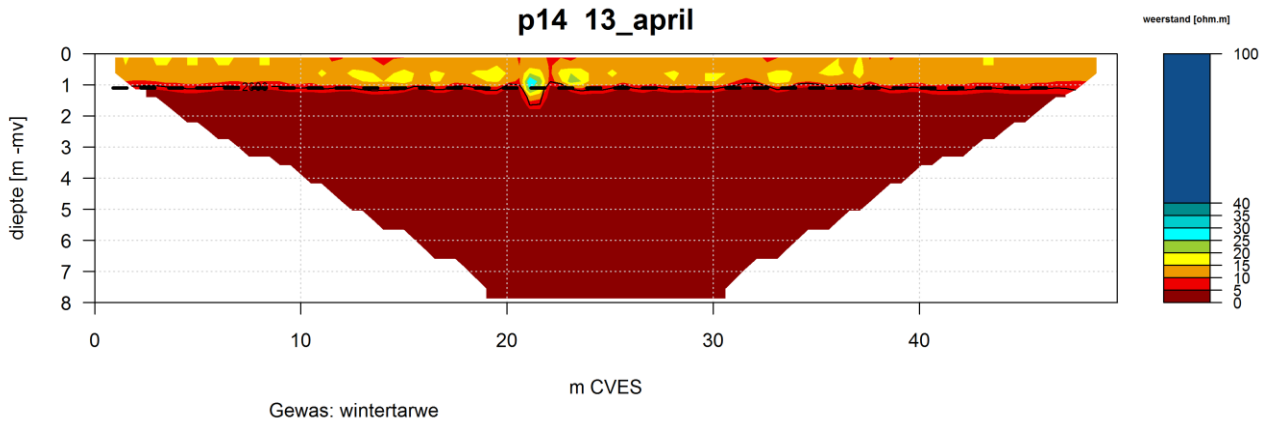
- 0.0 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltes [mg/l]

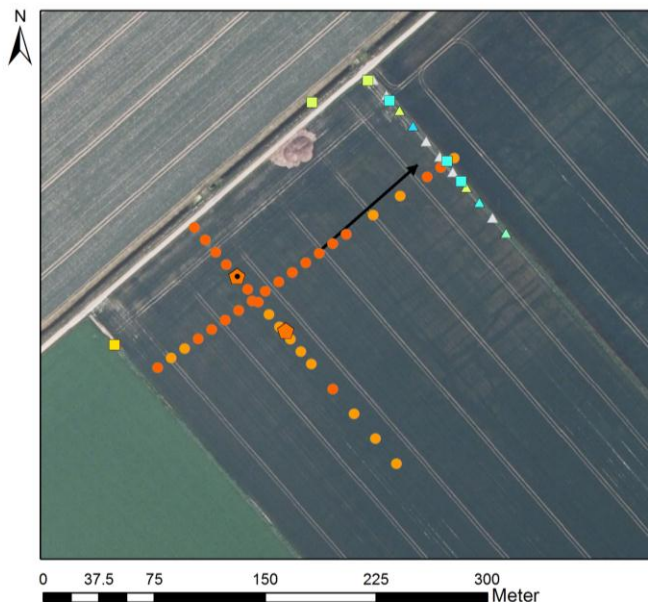
- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000



Locatie	Woldendorp
Eigenaar	Fleddema
Perceelnummer	15



Bodemtype	Bodemkaart	Mn25A-VI
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	luzerne
Drainafstand (m)	Gemeten	10-12
Draindiepte (m)	Gemeten	-1
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.1
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	0.4
Formatiefactor	Berekend	3.8
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-1.6
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	8.9
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-1.9



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

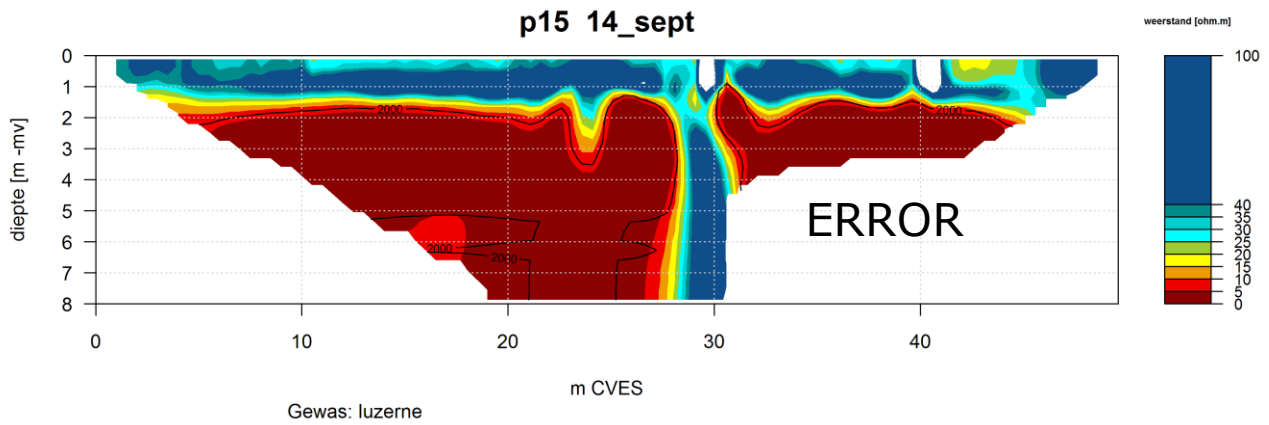
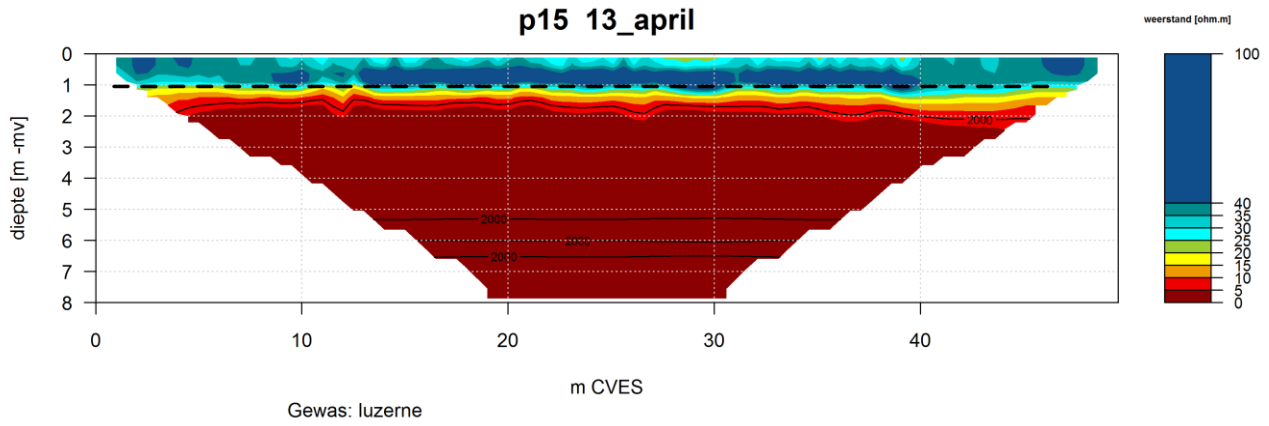
- 0.0 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

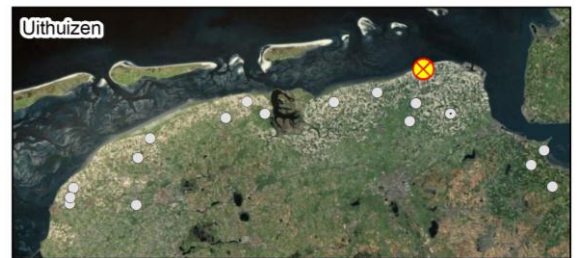
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

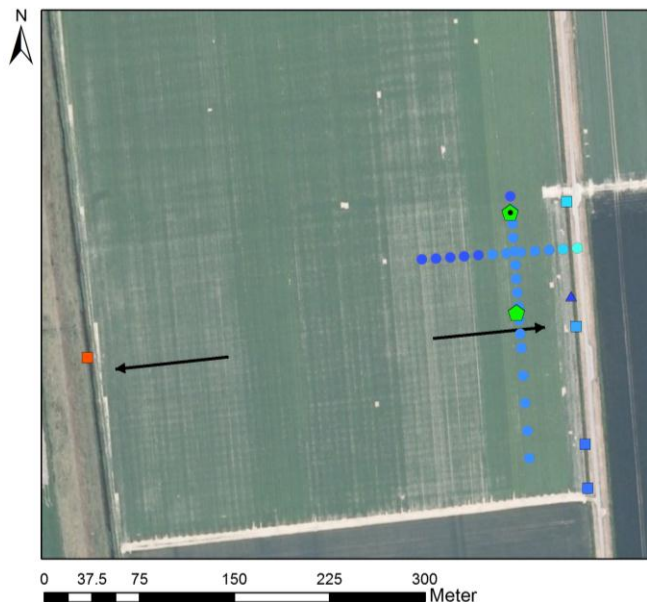
- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000



Locatie	Uithuizen
Eigenaar	Coolman
Perceelnummer	17



Bodemtype	Bodemkaart	Mn25A-VI
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	wintertarwe
Drainafstand (m)	Gemeten	10
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.2 tot -1.3
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.3
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	0.5
Formatiefactor	Berekend	5.6
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-7
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	0.7
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-0.6



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

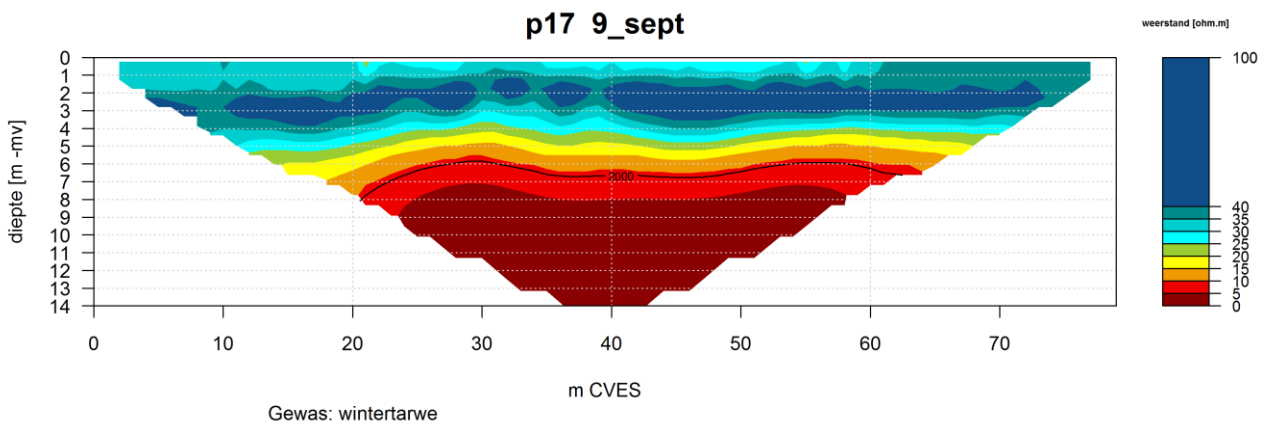
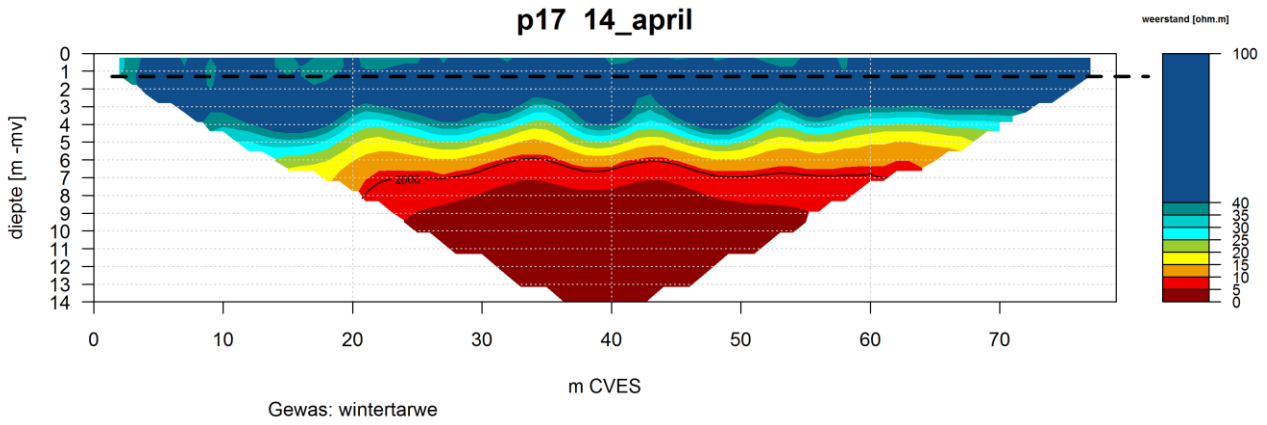
- 0.0-1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

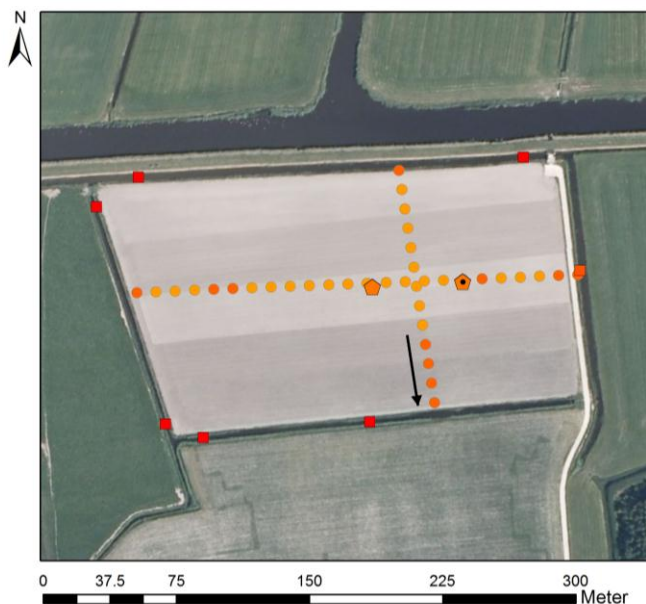


Sexbierum, Voorrijp

Locatie	Voorrijp Sexbierum
Eigenaar	M. Hollinga
Perceelnummer	18



Bodemtype	Bodemkaart	Mo 10A-II
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	wintertarwe
Drainafstand (m)	Gemeten	8-14
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.37
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.24
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	0.13
Formatiefactor	Berekend	3.3
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	-1.6
Dikte Deklaag (m)	Dinoloket	1.8
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-2.1



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

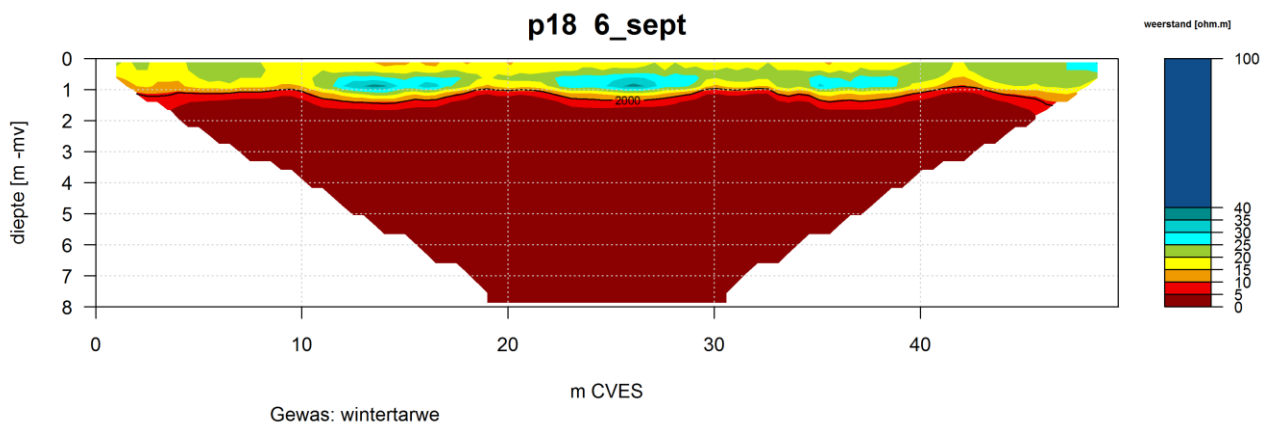
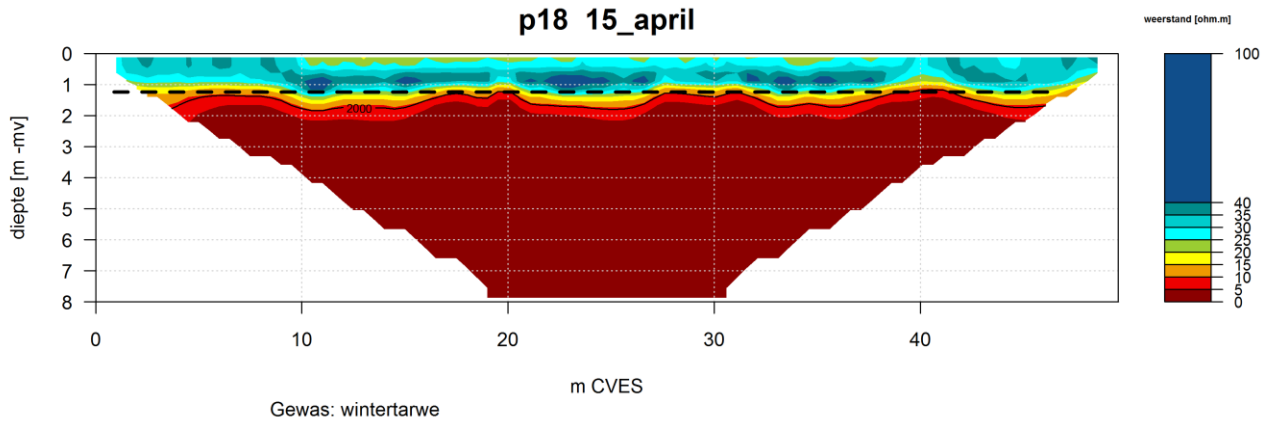
- 0.0 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

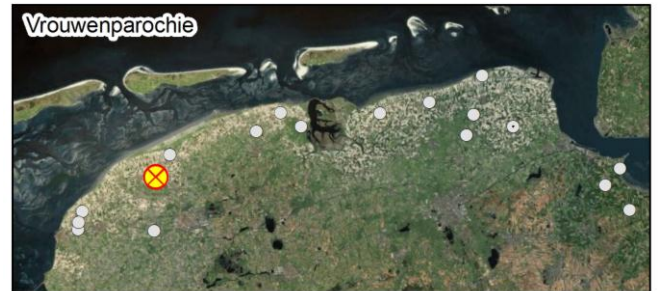
Chloridegehaltes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000

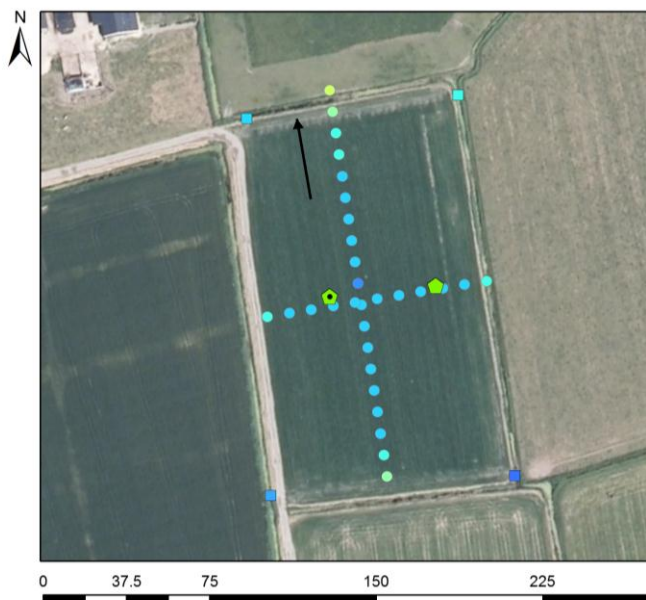


Vrouwenparochie

Locatie	Vrouwenparochie
Eigenaar	W.Limburg
Perceelnummer	19



Bodemtype	Bodemkaart	Mn35A-VI
Bodemsoort	Bodemkaart	zavel
Gewas in 2010	Eigenaar	consumptie aard./gras
Drainafstand (m)	Gemeten	8-12
Draindiepte (m)	Gemeten	-1.5
Grondwaterstand (m)	Gemeten	-1.3 tot -1.47
Doorlatendheid bodem (m/d)	Gemeten	0.16
Formatiefactor	Berekend	4.8
Diepte zoet-zout grensvlak (m)	Gemeten	< -7
Dikte Deklaag (m)	Dinoloet	1.9
Gemiddeld polderpeil (m NAP)	Kaart waterschap	-0.8



Legenda

symbolen

- △ drainwater
- oppervlaktewater
- drainrichting

CVES zoet-zout grensvlak [m -mv]

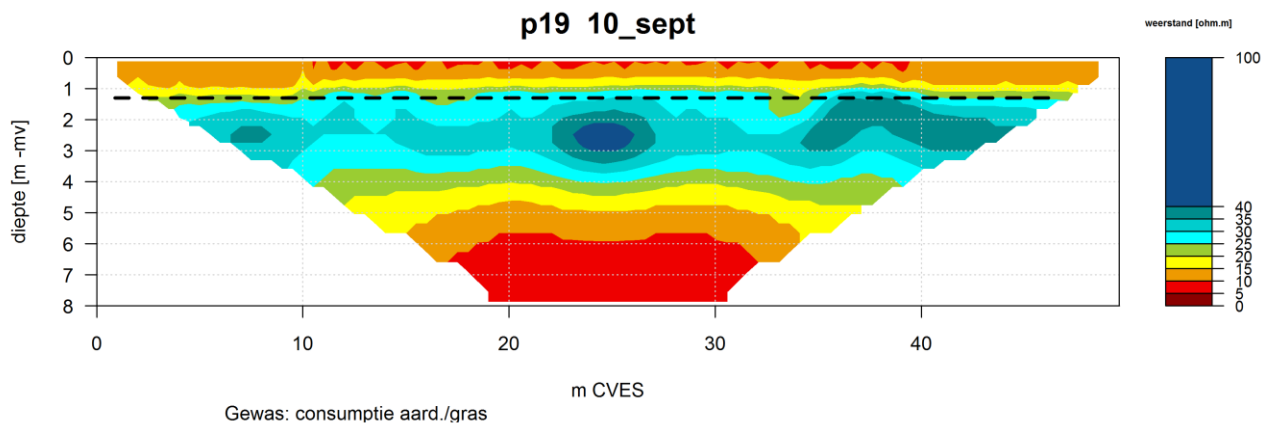
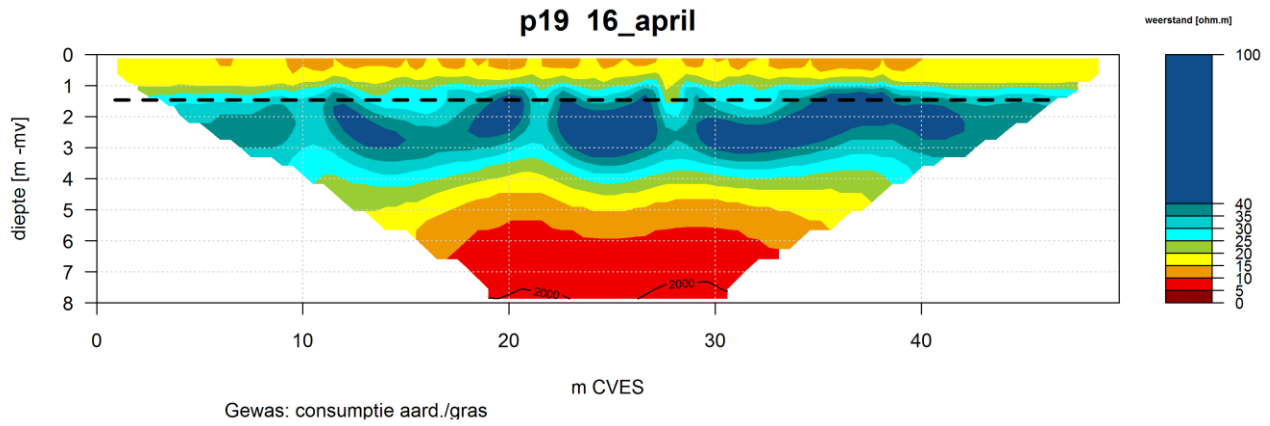
- 0.0 - 1.0
- 1.0 - 3.0
- 3.0 - 4.5
- 4.5 - 6.0
- 6.0 - 7.5
- 7.5 - 10.0
- begin CVES [0 meter]

EM34, geleidbaarheid [mmho/m]

- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 125
- 125 - 150
- > 150

Chloridegehaltenes [mg/l]

- geen waarde
- 1 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 1250
- 1250 - 1500
- 1500 - 2000
- 2000 - 5000
- > 5000



Bijlage 2. Veldonderzoekmethoden

Geofysische metingen [Algemeen]

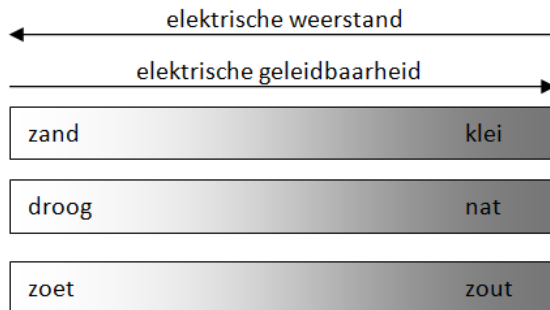
Met een geofysische meetmethode wordt de elektrische geleidbaarheid of weerstand van de ondergrond gemeten. De geleidbaarheid is de reciproke van de weerstand. Afhankelijk van de meetmethode wordt de gemeten waarde in geleidbaarheid of weerstand uitgedrukt. De gemeten waarde is de optelsom van weerstand (of geleidbaarheid) van de bodemsoort, het vochtgehalte en het zoutgehalte van het grondwater. Elke methode heeft voor en nadelen qua meetbereik, dieptebereik, resolutie, tijd die nodig is voor het uitvoeren van een meting en ten slotte de interpretatie (software).

Schijnbare en specifieke weerstand

Een metingen van de weerstand van de ondergrond resulteert in een gemeten schijnbare weerstand. Deze schijnbare weerstand is een gemiddelde van de specifieke weerstand van verschillende bodemlagen vanaf het maaiveld tot de maximaal gemeten diepte (meetbereik). Bij een homogene bodem (en homogene samenstelling van het grondwater) is de schijnbare weerstand gelijk aan de specifieke weerstand.

Formatieweerstand en waterweerstand

De gemeten formatieweerstand geeft de weerstand weer van de ondergrond en het poriewater. In algemeen geldt dat een lage weerstand overeenkomt met ofwel klei/veen, zout poriewater of een combinatie. Een hoge weerstand komt overeen met zand, zoet water of een combinatie. Zand met zout poriewater geeft dus een lagere weerstand dan zand met zoet water (geïllustreerd in Figuur 1). Voor een juiste interpretatie van de resultaten van weerstandsmetingen is vaak aanvullende informatie nodig. Vaak is dat al aanwezig (bijvoorbeeld DINOloket) maar ook kan het nodig zijn de meting uit te voeren in combinatie met grondboringen (grondwaterstand en bodemopbouw), EC metingen van het grondwater en hoogtemetingen (vanwege evt. hoogteverschillen).



Figuur 1 Invloed bodem en grondwatereigenschappen op geleidbaarheid en weerstand.

Door toepassing van de wet van Archie met betrekking tot de relatie tussen formatie- en waterweerstand en toepassing van een empirische relatie tussen waterweerstand en chloridegehalte kan uit de gemeten formatieweerstand een indicatie worden gegeven over het chloridegehalte van het grondwater.

De weerstand ρ_f in Ohmm is gerelateerd aan de watergeleidbaarheid σ_f (EC) in $\mu\text{S}/\text{cm}$ volgens:

$$(1) \quad \sigma_f = \frac{\rho_f}{10000}$$

Eerst dient de gemeten geleidbaarheid door VES, CVES of te worden geconverteerd naar een standaardtemperatuur van 20 °C met behulp van de hier gemodificeerde relatie van Jorgensen (1989):

$$(2) \quad \sigma_{f20} = \sigma_f \frac{82}{2T + 42}$$

waar σ_{f20} de standaard formatiegeleidbaarheid bij 20 °C, σ_f de gemeten formatiegeleidbaarheid en T de temperatuur is. De temperatuur op elke diepte kan worden afgeleid uit waarnemingen of de geometrische gradiënt en de gemiddelde jaartemperatuur aan het oppervlak. Waar geen metingen beschikbaar zijn is een temperatuur (T) van 10 °C (Volker, 1962) aangenomen.

De formatiegeleidbaarheid σ_{f20} moet worden omgezet naar een watergeleidbaarheid σ_w met behulp van de formatiefactor F op basis van de volgende relatie:

$$(3) \quad \sigma_{w20} = \sigma_{f20} * F$$

Er zijn wel enkele standaardwaarden voor de formatieconstante per bodemsoort beschikbaar die een indicatie geven (Tabel 1). Voor zover mogelijk dient de formatiefactor altijd bepaald te worden op basis van gemeten geleidbaarheid van het grondwater. De gemeten geleidbaarheid van het poriewater wordt gedeeld door de gemeten specifieke geleidbaarheid op de diepte van het poriewater. Deze specifieke geleidbaarheid kan zijn gemeten met de methoden die in de volgende paragrafen aan de orde komen (te weten: VES-, CVES- of prikstokmeting).

Tabel 1 Enkele standaardwaarden voor de formatiefactor

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

* schijnbare formatie factor want voor kleilig sediment varieert F met de geleidbaarheid van het poriewater.

De watergeleidbaarheid σ_{w20} in $\mu\text{S}/\text{cm}$ kan vervolgens worden gebruikt om het chloridegehalte in mg/l te herleiden op basis van de empirische relatie van Post (2008), die is gebaseerd op een groot aantal analyses van grondwater in Laag Nederland. Het bicarbonaatgehalte HCO_3 in mg/l speelt hierin ook een rol. De gevonden relatie ziet er als volgt uit:

$$(4) \quad \sigma_{w20} = 2.91 * 10^2 + 2.71 * Cl - 2.49 * 10^{-5} * Cl^2 + 9.34 * 10^{-1} * \text{HCO}_3$$

Die met de kwadraatformule omgezet kan worden omgezet naar een relatie waarmee het chloridegehalte kan worden bepaald:

$$(5) \quad Cl = \frac{-2.71 + \sqrt{2.71^2 - (4 * 2.49 * 10^{-5} * (-\sigma_w + 291.81 + 0.93 * \text{HCO}_3))}}{2 * 2.49 * 10^{-5}}$$

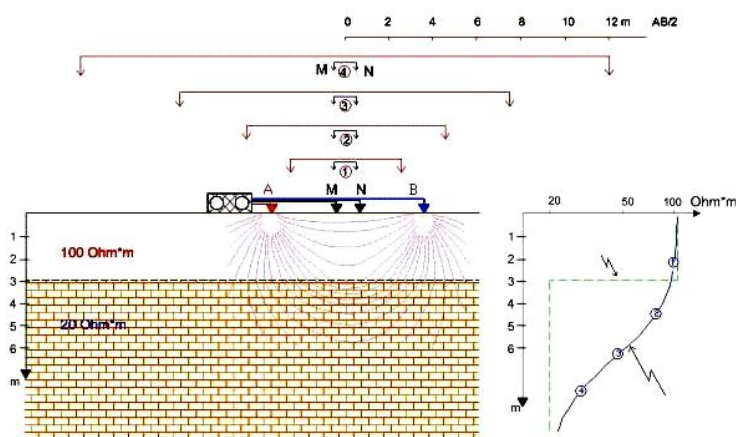
De hier beschreven empirische relaties hebben uiteraard beperkingen. Zo geldt voor relatie 5 dat deze toepasbaar is bij een watergeleidbaarheid groter dan 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

EM34: Electro-magnetische meting

Met de EM34 wordt de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond gemeten. Dit wordt gedaan door vanaf een zendspoel een wisselstroom de grond in te sturen zodat een primair magnetisch veld wordt opgewekt. Dit magnetische veld induceert kleine stromen in de ondergrond die weer een secundair magnetisch veld opwekken. Er is gebruik gemaakt van de de Geonics EM-34 die voor drie verschillende afstanden (10, 20 en 40 meter) en de bijbehorende dieptes de geleidbaarheid in milli-Mho/meter geven. Wanneer meerdere metingen op rij worden uitgevoerd, geeft deze meting een eerste indruk van de variatie op het perceel.

VES: Vertical Electrical Sounding

Bij een VES meting (Vertical Electrical Sounding) wordt op één punt de schijnbare weerstand van de ondergrond gemeten. Dit wordt gedaan door tussen twee stroomelektroden een stroom door de ondergrond te sturen. Twee potentiaalelektroden ertussenin meten het potentiaalverschil. De afstand tussen de stroomelektroden wordt in stappen vergroot waardoor telkens over een andere diepte de schijnbare weerstand wordt gemeten.



Figuur 2. Schematische weergave van de meetopstelling van een VES (links) en de resulterende interpretatie in een lagenmodel (rechts) (bron http://www.georesearch.ro/geofizica_en.html).

Op basis van het potentiaalverschil (V), de stroomsterkte (I) en een geometrische factor (G) (afhankelijk van de elektrodeafstand) kan de schijnbare weerstand (ρ_a) van de ondergrond worden berekend:

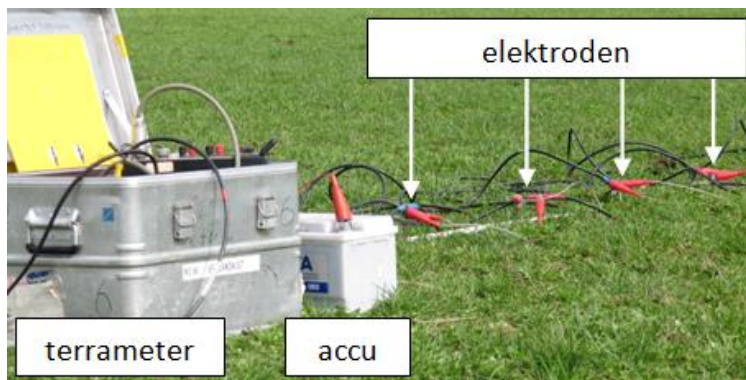
$$(9) \quad \rho_a = G * \frac{V}{I}$$

De schijnbare weerstand is het gemiddelde van de weerstand van verschillende bodemlagen vanaf het maaiveld tot op een bepaalde diepte (afhankelijk van de elektrodeafstand). De metingen zijn uitgevoerd met een ABEM Terrameter SAS 300B met toebehoren. De interpretatie naar lagenmodellen is uitgevoerd met behulp van het softwarepakket SchlumBG. Het resultaat is een lagenmodel van de formatieweerstanden op één punt.

CVES: Continuous Vertical Electrical Sounding

Een VES meting geeft een eendimensionaal beeld van de ondergrond. Voor een tweedimensionaal beeld van de ondergrond worden meerdere elektroden op rij geplaatst (figuur 3), een zogenaamde CVES meting (Continuous Vertical Electrical Sounding).

Metingen met de mogelijke elektrodencombinaties zijn uitgevoerd door een ABEM SAS4000 Terrameter. Hierdoor wordt de elektrische weerstand op meerdere diepten en locaties over de raai gemeten. De resolutie en penetratiediepte zijn afhankelijk van de gekozen profiellengte en de daarmee vastgelegde elektrodeafstand. Er kan gekozen worden voor verschillende configuraties. Gekozen is voor hoge resolutiemetingen met de zogenaamde de Schlumberger configuratie (ca. 750 metingen per profiel). Interpretatie door het softwarepakket RES2Dinv van GEOTOMO Software resulteert in een tweedimensionaal weerstandsbeeld van de ondergrond.



Figuur 3. Meetopstelling CVES

Prikstok

De prikstok is een metalen stok met aan het uiteinde sensoren voor het meten van de temperatuur (T) en de elektrische geleidbaarheid (EC) (Wirdum, 2004). Voor het meten is de WTW 3310 EC meter gebruikt die aan de prikstok wordt gekoppeld.



Figuur 4. Prikstokpunt en gebruik prikstok

Vanwege de verschillende manieren van meten tussen prikstok en EC-meter dient de prikstok-EC eerst nog vermenigvuldigd te worden met een correctiefactor die voor elke

prikstok is bepaald met ijkvloeistoffen. Deze waarde is voor deze prikstok vastgesteld op 0.38.

De prikstok wordt op de gewenste plaats met de hand in de grond geduwd. Met behulp van de peilschaal die in de stok gegraveerd is wordt iedere 10 cm een EC en T waarde waargenomen en genoteerd. Elke keer dat de stok verder wordt geduwd moet 1 a 3 minuten gewacht worden om de EC en T waarden in te laten stellen. Aan de hand van deze gegevens worden de geleidbaarheidswaarden van het grondwater bepaald en in diepteprofiel uitgezet.

Hooghoudtproef : Bepaling doorlatendheid (k-waarde)

Om de doorlatendheid (k-waarde) van de bodem te bepalen wordt een Hooghoudtproef uitgevoerd. Hiervoor wordt een boorgat tot onder de grondwaterspiegel geboord. Het water wordt in één keer uit het gat verwijderd en met een regelmatig tijdsinterval wordt het verloop van de grondwaterstand gemeten. Uit de snelheid waarmee het grondwater omhoog komt kan de doorlatendheid van de ondergrond berekend worden. De doorlatendheid van de bodem is van belang voor de perceelsmodellering. De k-waarde bepaalt hoe snel de grondwaterstand reageert op veranderingen (in oppervlaktewater, drains, greppels) en neerslag.

Divers

Voor de continue meting van (grond)waterstanden, EC waarden en temperatuur is gebruik gemaakt van divers (Schlumberger). Deze divers meten met een bepaalde ingestelde frequentie en slaan dit op. Met behulp van een kabel en laptop kunnen de divers in het veld worden uitgelezen (figuur 7). Er zijn verschillende tyep divers toegepast.

Barodiver

De Barodiver meet (lucht)druk en temperatuur. Voor de luchtdruk is de nauwkeurigheid ongeveer 0.3% van de volle uitslag en de resolutie 0.1 cm H₂O. Voor de temperatuur is de nauwkeurigheid 0.1 °C en de resolutie 0.01 °C. Er is gemeten met een meetfrequentie van 5 en/of 10 minuten.

De Barodiver is gebruikt om de gemeten waterdruk te compenseren voor de luchtdruk. De Barodiver is geïnstalleerd op een droge plaats in de nabijheid van de andere divers.



Figuur 7. Uitlezen diver in het veld.

Micro- of Mini-diver

De Micro – of Mini-diver meet (water)druk en temperatuur. Voor de luchtdruk is de nauwkeurigheid ongeveer 0.05% van de volle uitslag en de resolutie 0.2 cm H₂O. Voor de temperatuur is de nauwkeurigheid 0.1 °C en de resolutie 0.01 °C. Er is gemeten met een meetfrequentie van 5 en/of 10 minuten. De Micro – of Mini-diver is gebruikt om grondwaterstanden te meten. Hiervoor is de diver op de gewenste diepte in een peilbuis gehangen.

CTD-diver

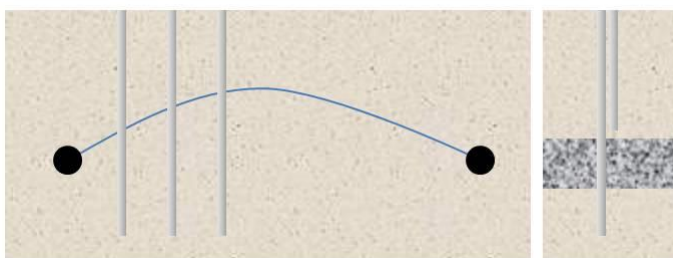
De CTD-diver meet (water)druk, temperatuur en elektrische geleidbaarheid (EC). Voor de luchtdruk is de nauwkeurigheid ongeveer 0.1% van de volle uitslag en de resolutie 0.2 cm H₂O. Voor de temperatuur is de nauwkeurigheid 0.1 °C en de resolutie 0.01 °C. Voor de elektrische geleidbaarheid is de nauwkeurigheid 1% van de gemeten gegevens en de resolutie 0.1% van de gemeten gegevens. Er is gemeten met een meetfrequentie van 5 en/of 10 minuten. De CTD-diver is voornamelijk gebruikt om de geleidbaarheid van het draineffluent te meten.

Grondwaterstanden

De grondwaterstand geeft inzicht in bodemeigenschappen en de processen in de ondergrond. Van belang is de ruimtelijke variatie in de grondwaterstand (bijvoorbeeld opbolling tussen drains) en de temporele variatie (reactie op neerslag en verdamping).

Grondwaterstanden worden gemeten door het plaatsen van peilbuizen met een filter op de gewenste diepte. In deze peilbuizen kan vervolgens een diver worden gehangen voor automatische metingen of er kan met regelmaat een handmeting worden uitgevoerd.

De variatie van de grondwaterstand tussen ontwateringsmiddelen wordt gemeten door de locaties van de peilbuizen op regelmatige afstanden tussen drains/greppels of vanaf een watergang te kiezen. Gegevens over stijghoogteverschillen tussen twee lagen worden verkregen door peilbuizen op verschillende dieptes te plaatsen. Het verschil in gemeten waterhoogte tussen een diepe en een ondiepe peilbuis in combinatie met de doorlatendheid van de bodemlaag tussen de twee peilbuizen wordt gebruikt om de kweldruk te bepalen.



Figuur 8 Meten grondwaterstand (links) en stijghoogteverschil (rechts).

Neerslag en verdamping

Neerslag kent een sterke ruimtelijke variatie. Er is daarom in elke polder nabij de meetpercelen een regenmeter geplaatst. Er is gebruik gemaakt van de e+ RAIN datalogger met kunststof regenmeter van Eijkelkamp. Er is gemeten met een frequentie van 10 minuten waarbij de neerslagsom worden opgeslagen.

De regenmeter werkt volgens de 'tipping bucket' methode die 1 puls geeft per 0.2 mm. De regenmeter heeft een oppervlak van 507 cm² en een hoogte van 34 cm. De regenmeter is op een standaard geplaatst, zodat de hoogte van de opening op ongeveer 1 meter boven maaiveld is.

Voor de verdamping is aangenomen dat de ruimtelijke variatie minder sterk is. Voor de verdampingswaarden is gebruik gemaakt van de metingen van nabij gelegen neerslagstations van het KNMI.



Figuur 10. Regenmeter