

Bodem en Water

Princetonlaan 6
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 30 256 42 56
F +31 30 256 44 75
info-BenO@tno.nl

Deltares-rapport

2008-U-R0546/A

Zoet-zout studie Provincie Flevoland

Datum	14 mei 2008
Auteur(s)	Gualbert Oude Essink Perry de Louw Michelle van Vliet Esther van Baaren Bart Goes Corne Prevo Francesco Sergi Valentina Marconi Peter Vos Vincent Post (Vrije Universiteit)
Opdrachtgever	Provincie Flevoland
Projectnummer	092.79146
Aantal pagina's Aantal bijlagen	160 (incl. bijlagen)
Goedgekeurd door	B. Minnema

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2008 TNO

Samenvatting

Doelstelling

De doelstelling van de studie, zoals gedefinieerd door de Provincie Flevoland, luidt:

Het beschikbaar maken en stellen van kennis ten behoeve van strategieontwikkeling voor duurzame exploitatie van het zoete grondwater, het grondwaterbeleid en -beheer, ruimtelijke ordeningsprocessen en afstemming tussen grondwatergebruik en oppervlaktewatergebruik.

Plan van aanpak

In deze Zoet-zout Studie Provincie Flevoland heeft integratie van de volgende componenten geleid tot meer inzicht in de effecten van onttrekkingen voor een duurzaam zoet grondwaterbeheer:

1. een inventarisatie van chloride concentratie metingen;
2. een watersysteem analyse,
3. een drie-dimensionale zoet-brak-zout grondwater kartering,
4. een meetcampagne in de Noordoostpolder nabij Espel, en
5. een analytische en numerieke modellering van de effecten van grondwateronttrekkingen op het grondwatersysteem.

Verdeling zoet, brak en zout grondwater

Voor de bepaling van de 3D verdeling van zoet, brak en zout grondwater in de Provincie Flevoland is gebruik gemaakt van de uitgebreide databestanden die bij TNO in beheer zijn. De chloride concentratie lijkt een grote variatie te hebben in ruimte en diepte. Los van de bekende grote zoete grondwatervoorraden in het diepe derde watervoerend pakket in Zuidelijk Flevoland die gebruikt worden door Vitens voor de drinkwaterwinning bevinden zich winbare ondiepe zoete grondwatervoorraden bij de randmeren en ten zuidoosten van de Oostvaarderplassen. Het IJsselmeer en het middendeel van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland zijn grotendeels brak tot matig zout tot een diepte van ongeveer -40m N.A.P. Op een grotere diepte (-40 – -60m N.A.P.) is het grondwater van het IJsselmeer matig zout tot zout en is vooral rond Almere een groot zout tot zeer zout gebied te vinden. In de Noordoostpolder bevindt zich al op zo'n 15 meter diepte brak grondwater onder de driehoek Emmeloord-Urk-Espel en op de provinciegrens met Friesland en Overijssel. Met de diepte zijn in de Noordoostpolder de zoutgehalten echter lager dan zoutgehalten bij Almere en Lelystad/Dronten.

In tegenstelling tot de Noordoostpolder is er in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland een duidelijke relatie waargenomen tussen de chloride concentratie verdelingen in de ondergrond en de aanwezigheid van scheidende (klei)lagen. De lagere chloride concentraties in de Noordoostpolder in vergelijking tot Zuidelijk en Oostelijk Flevoland kunnen verklaard worden doordat de tweede scheidende laag in de Noordoostpolder bijna niet voorkomt en niet echt scheidend is, waardoor zout gemakkelijker dieper kan doordringen in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland. De zoutvoorkomens rond Almere en Lelystad/Dronten zijn van elkaar gescheiden door een duidelijk zoetwaterlichaam dat in contact lijkt te staan met het "oude land" (rond de Knardijk). De aanwezigheid hiervan is te verklaren door het feit dat hier in het verleden nauwelijks verzilting dus infiltratie van zeewater heeft plaatsgevonden door de aanwezigheid van hoogveen. De scheidende

lagen boven het derde watervoerende pakket hebben verzilting van de onderliggende zoetwatervoorraad voorkomen.

Het ontstaan van zoete grondwatervoorraden

Het zoutgehalte van het grondwater van de polders varieert sterk. Gezien de lange perioden tijdens het Pleistoceen waarin de bodem met zoet water kon worden doorgespoeld, zijn de huidige patronen in de zoet-zout verdeling waarschijnlijk niet toe te schrijven aan de transgressies gedurende het Pleistoceen. De Eemzee heeft ongetwijfeld in een periode van ongeveer 6000 jaar (130.000 jaar geleden) de gehele ondergrond verzilt. Echter, de daarop volgende continentale periode die ruim 100.000 jaar duurde en waarin vlechtende rivieren het gebied doorstroomden, was lang genoeg om de pakketten weer te verzoeten. Hoe dieper hoe moeilijker deze verzoeting ging en het is daarom mogelijk dat in de slechter doorlatende pakketten op ongeveer 200m diepte zout Eem water is terug te vinden.

Zout grondwater in de bovenste 200 meter van de provincie Flevoland is zeer waarschijnlijk volledig toe te schrijven aan de transgressies gedurende het Holocene. De belangrijkste transgressie was die in het vroeg-Holocene ongeveer 5000 jaar geleden. De deklaag was nauwelijks gevormd, infiltratie van zout water kon eenvoudig plaatsvinden en werd nog eens versneld door het proces dat dichtheidstroming wordt genoemd. De verzilting was het grootst ter plaatse van de getijdengeulen waar weerstandsbiedende slechtdoorlatende lagen grotendeels afwezig waren. Daarnaast was verzilting afwezig op hoger gelegen delen die bedekt waren met hoogveen. Het zoute water dat infiltreerde varieerde met locatie en tijd in zoutgehalte door verdunning als gevolg van de aanwezigheid van de monding van verschillende beken en/of rivieren. Vanaf 500 na Chr. vinden hernieuwde inbraken plaats en transformeerde het Almere in een lagune met een toenemende zoutbelasting vanuit het noorden (Zuiderzeefase). In deze periode maakt de Rijn contact met de IJssel waardoor het debiet van deze rivier sterk toeneemt. Dit veroorzaakt een sterke gradiënt in het zoutgehalte van het lagune water, de westkant is veel zouter dan de oost- en zuidkant. Tussen Staveren en Enkhuizen ontwikkelden zich vrij diepe getijdengeulen (cf. de val van Urk) met ten zuiden daarvan belangrijke zandbanken (cf. het Enkhuizer zand). Op grond hiervan kan worden verwacht dat de circulatie, vanuit de Waddenzee, in het noordelijk deel van de Zuiderzee veel beter zal zijn geweest dan in het zuidoostelijk deel. Dit impliceert ook een zuid-noord zoutgradiënt.

In de Noordoostpolder was van mariene invloed pas sprake ten tijde van de aanwezigheid van de Zuiderzee. Verzilting van de ondergrond van een deel van de Noordoostpolder heeft dus slechts gedurende een relatief korte tijdsperiode van enkele eeuwen kunnen plaatsvinden. Daarnaast was in deze periode de deklaag al behoorlijk ontwikkeld en bemoeilijkt deze laag infiltratie van brak tot zout water. Bovendien waren door mening van zoet rivierwater de zoutgehaltes van het water in dit deel van de Zuiderzee relatief laag door de nabijheid van de monding van de IJssel. Deze drie factoren verklaren waarom in de ondergrond wel zout grondwater aanwezig is maar ook waarom de zoutgehaltes lager zijn dan de voorkomens in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland bij Almere en Lelystad/Dronten. Ook in de overige delen van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland heeft verzilting vanuit de Zuiderzee plaatsgevonden. De snelheid waarmee verzilting optrad was echter veel lager dan tijdens het Vroeg Holocene vanwege de aanwezigheid van de Holocene deklaag en de kortere periode waarin dit plaatsvond.

De afsluiting van de Zuiderzee (1932) heeft ertoe geleid dat geleidelijk een overgang van zoute naar brakke tot zoete condities aan het plaatsvinden is. Uit de meetcampagne in het detailgebied rondom Espel, Noordoostpolder komt echter naar voren dat er

vooralsnog geen bewijs is dat het grondwater door de kwelstroom vanuit het IJsselmeer verzoet. Het lijkt er zelfs op dat dieper gelegen brak tot zout grondwater door de dijkkwelstroom door het grote peilverschil versneld naar het oppervlak wordt 'gedrukt'.

Aanvulling zoete grondwatervoorraden

Kwel en infiltratie zijn niet alleen van belang voor het grondwaterregime maar ook bepalend voor de zoet-zout verdeling in de watervoerende pakketten. Bij de randen van de polders wordt een sterke kwelflux gegeneerd terwijl in het centrale deel van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en overgrote deel van de Noordoostpolder infiltratie dominant is. Verder valt op dat in alle grote vaarten kwel optreedt; dus ook in de infiltratiegebieden.

Sinds de inpoldering vindt infiltratie plaats vanuit het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren, waarna het water opkwelt in de polders. De reistijden van het water dat direct achter de dijk opkwelt is kort (enkele tientallen jaren). Echter, de reistijd van kwelwater neemt zeer sterk toe met afstand van het open water. In Oostelijk Flevoland, is het effect van inpoldering dat het grensvlak van het nieuwe IJsselmeersysteem en het Veluwesysteem meer in de richting van het centrum van de polder opschuift. Op basis hiervan kan grofweg een onderverdeling worden gemaakt tussen het westelijk en zuidelijk deel van Flevoland dat voornamelijk onder invloed van het IJsselmeer is komen te staan en het oostelijk deel dat wordt beïnvloed door het Veluwe systeem. In vergelijking tot Zuidelijk Flevoland reikt het kleine hydrologische deelsysteem genaamd het Flevopoldersysteem in Oostelijk Flevoland veel dieper; tot in het derde watervoerend pakket. Door de insnijding van de watergangen door de deklaag en door het lage waterpeil van de watergangen is de stijghoogte in de diepere watervoerende pakketten ook lager. Het aanwezige potentiaalverschil leidt ertoe dat het infiltrerende neerslagwater tot diep in de ondergrond stroomt. De situatie in de Noordoostpolder is vergelijkbaar met de situatie van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland; daar waar de watergangen de deklaag doorsnijden (noordoostelijke helft) reikt het Noordoostpolder systeem diep tot in het derde watervoerend pakket. Bij geen doorsnijding (zuidwestelijke helft) reikt dit systeem slechts tot in het eerste watervoerend pakket. Dit patroon wordt bevestigd door stijghoogtemetingen.

In principe zijn de kwelgebieden (langs randen en in grote vaarten en tochten) en infiltratiegebieden (daar waar vaarten insnijden en scheidende lagen op diepte ontbreken) van belang voor de aanvulling van zoete grondwatervoorraden, en indirect dus de zoet-zout verdeling in de watervoerende pakketten. Pas op een tijdsperiode van minstens enkele tientallen jaren zal echter de aanvulling van zoet grondwater substantieel kunnen zijn.

Verzoeting en verzilting

De chloride concentratie in het grondwatersysteem van de Provincie Flevoland heeft een grote variatie in ruimte en diepte, maar veel minder in de tijd. De uitgebreide dataset van DINO is gebruikt om de verzoeting of verzilting van delen van het grondwatersysteem te bepalen. Er treedt verzoeting op in meerdere gebieden van de Provincie Flevoland, vooral in de bovenste 20 meter in het noordwestelijk deel van de Noordoostpolder, het westelijk deel van Zuidelijk Flevoland en de toch al redelijk zoete randmeren. Voor deze analyse is de tijdsspanne van de analyse van groot belang. Verzilting treedt nog wel op tot in de jaren '70 (in het westelijk deel van Zuidelijk Flevoland op een diepte van -40 - -60 m N.A.P.), maar daarna vindt voornamelijk verzoeting plaats. Punten met sterke verzilting zijn hoofdzakelijk waargenomen in het noordelijke en zuidelijke deel van het IJsselmeergebied.

Invloed onttrekkingen op zoetwaterbeheer

In de analyse om te komen tot risico kaarten waarin de invloed van de grondwateronttrekkingen op het zoetwaterbeheer in de Provincie Flevoland is weergegeven zijn in deze studie verschillende methodieken gecombineerd:

- a. schematisaties van in de praktijk voorkomende posities van slechtdoorlatende laag-filter-brak grensvlak,
- b. analytische modellering van stijghoogteverlaging van grondwateronttrekkingen,
- c. analytische modellering van het opkegelen van het zoet-zout grensvlak, en
- d. tenslotte numerieke modellering van dichtheidsgedreven grondwater en gekoppeld stoftransport; daarbij zijn de volgende factoren van belang: 1. de afstand van brak en zout grondwater tot de onttrekking; 2. de aanwezigheid zoet-zout inversies; 3. de aanwezigheid, diepte en dikte van slechtdoorlatende lagen; en 4. de diepte van het onttrekkingsfilter en het debiet en het regime van de onttrekking.

Met een analytisch model is een schatting gemaakt van de stijghoogteverlaging in het watervoerend pakket door alle grondwateronttrekkingen ter plaatse. Hiermee is op grove wijze aangegeven welke grondwateronttrekkingen in de Provincie Flevoland mogelijkwerijs zouden verzilten, indien brak tot zout grondwater dichtbij aanwezig is. Zo is weliswaar in Zuidelijk Flevoland de verlaging door de grote onttrekkingen van Vitens significant, maar bevindt brak tot zout grondwater zich aldaar op grote diepte, zodat het risico van verzilting niet noemenswaardig lijkt te zijn.

Volgens de analytische modellering voor opkegeling is de maximale verplaatsing van het huidige zoet-zout grensvlak ter plaatse van de onttrekkingsputten in de Provincie Flevoland klein (<1m) voor een groot deel van het studiegebied. Hier en daar wordt wel een verhoging van het grensvlak berekend: dit komt waarschijnlijk door de grote onttrekkingsdebieten. Op een aantal locaties ligt het berekende brak-zout grensvlak (1000 mg Cl-/l) nu al hoger dan de onttrekkingsput (zo ook in het zuiden van het veldwerkgebied rondom Espel). In noordelijk Flevoland, tussen de steden Lelystad, Dronten en Biddinghuizen, lijkt een kwetsbaar gebied te liggen. Dit zal te wijten zijn aan de ondiepe positie van het brak-zout grensvlak. Alleen in Zuidelijk Flevoland en het oostelijk deel van de Noordoostpolder komen enkele diepe putten voor met een hoge pompcapaciteit met mogelijkwerijs een hoog verziltingsrisico.

Uit met name de numerieke modellering blijkt dat de afstand tot brak-zout grondwater de belangrijkste factor is voor de verzilting in de onttrekkingsput. Hoe zouter het grondwater hoe meer zout in de onttrekking terecht zal komen. Een nauwkeurige kartering van de huidige zoet-brak-zout verdeling op regionale schaal is uitgevoerd in deze studie. Voor de locale schaal, viz. rondom individuele onttrekkingsputten, wordt echter aanbevolen een gedetailleerde kartering uit te voeren, eventueel in combinatie met aanvullende metingen en een numerieke modellering van de specifieke hydrogeologische omstandigheden, om de mogelijke verplaatsing van de zoet-brak-zout verdeling onder invloed van autonome processen op de middellange termijn te kunnen bepalen.

Over de invloed van slechtdoorlatende lagen kan geconcludeerd worden dat verzoeting optreedt indien de onttrekking plaatsvindt boven de slechtdoorlatende laag. Relatief zoet oppervlaktewater kan hierdoor gemakkelijk naar de onttrekking toestromen, terwijl brak-zout grondwater door de scheidende laag op afstand wordt gehouden. Verzilting treedt op indien de onttrekking plaatsvindt onder de slechtdoorlatende laag en zout grondwater niet ver weg ligt. Hoe hoger de weerstand van deze laag, hoe meer verzilting of verzoeting in de onttrekking. Hoe groter de afstand tussen de put en de initiële positie van het grensvlak, hoe kleiner de opkegeling.

De vele ondiepe grondwateronttrekkingen hebben een zodanig (klein) debiet dat ze slechts lokaal verzilting van het grondwatersysteem zullen veroorzaken door opkegeling van brak tot zout grondwater. Van een regionale vermindering van de totale zoetwatervoorraad in de Provincie Flevoland lijkt geen sprake te zijn. In infiltratie gebieden zal de zoetwatervoorraad enigszins groeien.

Risico kaarten zijn ontwikkeld voor drie verschillende chloride concentratie limieten (500, 1000 en 2000 mg Cl/l) en voor drie verschillende onttrekkingsdiepten (-20, -40 en -60 m N.A.P.). Uit de analyse blijkt dat voor het grensvlak van 500 mg/l er in totaal 85% van de bestaande putten behoren tot de categorie "Potentieel hoog risico" en slechts 14% tot "laag risico", terwijl dit voor het grensvlak van 2000 mg/l resp. 44% en 56% is (bijna een halvering in % putten met potentieel hoog risico).

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	3
	Lijst van tabellen en figuren	11
1	Inleiding.....	17
1.1	Aanleiding.....	17
1.2	Doelstelling.....	18
1.3	Afbakening	19
1.4	Aanpak.....	19
2	Geohydrologische opbouw van de ondergrond	21
2.1	Inleiding	21
2.2	Geohydrologische schematisatie.....	21
2.3	Kartering van de deklaag	23
2.4	Actuele hoogteligging.....	25
3	Paleohydrogeografische ontwikkeling	27
3.1	Inleiding	27
3.2	Paleohydrogeografische ontwikkelingen	27
3.3	Conclusies.....	35
4	Beschrijving grondwatersysteem.....	37
4.1	Inleiding	37
4.2	Algemene beschrijving watersysteem.....	37
4.3	Hydrologische deelsystemen	40
4.4	Infiltratie- en kwelgebieden	41
4.5	Conclusies.....	42
5	Ruimtelijke spreiding in chloride concentratie	45
5.1	Inleiding	45
5.2	3D verdeling van zoet, brak en zout grondwater	46
5.3	Chloride concentraties in het grondwater	48
5.4	Ruimtelijke verdeling van chloride grensvlakken	50
5.5	Chloride concentraties in oppervlaktewater.....	51
5.6	Relatie zoet-zout patronen en geologie.....	55
6	Veldwerk Studie Zoet-zout Grondwater Flevoland.....	59
6.1	Inleiding	59
6.2	Activiteiten	60
6.3	Resultaten	62
6.4	Conclusies.....	77
7	Numerieke modellering 3D zoet-zout grondwater	79
7.1	Inleiding	79
7.2	Analytisch model: stijghoogteverlaging door grondwateronttrekkingen.....	80
7.3	Analytisch model: opkegelen van het zoet-zout grensvlak.....	81
7.4	Beschrijving numeriek model.....	85
7.5	Modelresultaten	90
7.6	Conclusies.....	100

8	Risico-analyse op basis van slechtdoorlatende lagen en grensvlakken	101
8.1	Inleiding	101
8.2	Resultaten	103
9	Conclusies	113
10	Literatuur	117
	Bijlage(n)	
	A Dikte en verbreiding WVP en SLD volgens REGIS	
	B Analyse verzoeting en verzilting grondwater in Flevoland	
	C Profielen chloride patronen en link geologie	
	D Aandachtsgebied meetcampagne: satelliet beeld	
	E Gegevens eigenaren van bemeten onttrekkingsputten.	
	F Inversies brak-zoet grondwater in het veldwerkgebied	
	G Korte beschrijving software code MOCDENS3D	
	H Scenario's zoet-zout modellering	
	I Positie van grensvlakken tussen zoet-brak en zout	
	J Chloride gehalten op enkele diepten	
	K Diepte en pompcapaciteit van onttrekkingsput	

Lijst van tabellen en figuren

Tabellen

Tabel 1: Klasse indeling volgens Stuyfzand (1993).	45
Tabel 2: Klassenindeling chloride concentratie in oppervlaktewater van de Provincie Flevoland.	52
Tabel 3: Concentraties van een aantal stoffen in 31 bemeten onttrekkingsputten.	63
Tabel 4: Uitgebreide concentraties van een aantal stoffen in twee bemeten onttrekkingsputten, van landeigenaren waar ook de CVES-metingen hebben plaatsgevonden.	64
Tabel 5: Chloride concentraties in een drietal putten.....	67
Tabel 6: Verzadigde bodemweerstand voor het 2000 mg/l chloride grensvlak voor verschillende typen water verzadigd sediment (10000 $\mu\text{S}/\text{cm}=10 \text{ mS}/\text{cm}=1 \text{ Ohm-m}$).....	71
Tabel 7: Voorgestelde zoet-zout grenzen voor verschillende gewassen.	91
Tabel 8: Percentages van putten met potentieel hoog of laag risico in de Provincie Flevoland.	104
Tabel B1 Klassenindeling in tijd van chloride- en natriumanalyses in grondwaterputten van de Provincie Flevoland	1
Tabel B2 Klassenindeling in diepte van chloride- en natriumanalyses in grondwaterputten van de Provincie Flevoland	2
Tabel B3 Klassenindeling van de chloride concentratie in grondwaterputten van de Provincie Flevoland.....	2
Tabel B4 Klassenindeling van de verandering in chloride concentratie met de tijd ($d\text{Cl}/dt$) voor de bepaling van verzoeting en verzilting in grondwaterputten van de Provincie Flevoland.....	4
Tabel B5 Klassenindeling van de kationuitwisseling van natrium voor de bepaling van verzoeting en verzilting in grondwaterputten van de Provincie Flevoland.....	9
Tabel B6 Vergelijking van chloride tijdreeks en uitwisseling van natrium op verschillende diepten voor grondwaterput B25F0072.....	11

Figuren

Figuur 1: De geologische, geohydrologische en hydrogeologische opbouw van de ondergrond van Flevoland.....	22
Figuur 2: Dikte van deklaag (in m).....	23
Figuur 3: Dikte van de Holocene deklaag (m).....	24
Figuur 4: Dikte van basisveen (m).....	24
Figuur 5: Verticale weerstand van de deklaag (dagen).....	25
Figuur 6: Actuele hoogteligging Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en Noordoostpolder (AHN).....	26
Figuur 7: De verbreiding van de Eemzee ongeveer 130.000 jaar geleden.....	28
Figuur 8: Ligging van rivier- en beeklopen tijdens het Holoceen.....	29
Figuur 9: Reconstructie van het Pleistocene oppervlak aan het begin van het Holoceen.....	29
Figuur 10: Paleogeohydrologische ontwikkeling van 5500 v. Chr. – 800 n. Chr. Anno ~3850 v. Chr. en ~800 na Chr. kon in het grondwatersysteem van de Provincie Flevoland gemakkelijk brak tot zout oppervlaktewater infiltreren.....	30
Figuur 11: Holocene ontwikkeling in IJsselmeerpolders.....	31
Figuur 12: Binnen- en buitendijks land rond 1200 AD.....	31
Figuur 13: Opeenvolging.....	35
Figuur 14: Het verloop van het maaiveld, de grondwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in een noordwest-oostzuid profiel door het zuiden van Flevoland op basis van stijghoogtemetingen.....	37
Figuur 15: Stijghoogtemetingen van drie verschillende meetpunten: a) B26B0063, b) B26E0034 en c) B26G0252.....	39
Figuur 16: Oppervlakte waterpeil ten opzichte van onderkant van deklaag.....	41
Figuur 17: Kwel- en infiltratiefluxen in Flevoland en de Noordoostpolder (Royal Haskoning).....	42
Figuur 18: Lokaal grondwatersysteem met kwel in de watergangen en infiltratie tussen de watergangen.....	43
Figuur 19: Principe zoet-zout verdeling grondwater in Flevoland.....	46
Figuur 20: Locaties van VES-metingen, chloride concentratie analyses en boorgatmetingen in het studiegebied, die allemaal minder dan 5m zijn verwijderd van de onderkant van de deklaag (TNO, DINO Qua; Oude Essink et al., 2005).....	47
Figuur 21: Locatie van 1000, 2500 en 5000 mg Cl/l grensvlak, gebaseerd op de 3D verdeling van zoet, brak en zout grondwater.....	47
Figuur 22: Ruimtelijke verdeling van de chloride concentratie in de periode 1915-2005 in de Provincie Flevoland onderverdeeld in chlorideklassen volgens tabel B3 op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b).....	49
Figuur 23: Diepte van het grensvlak 1000 mg/l, tussen brak en zout grondwater.....	50
Figuur 24: Locatie en diepte van de inversies in het studiegebied (berekeningsmethode: de diepte van de inversie tussen brak en zoet grondwater is exact daar waar, van bovenaf gezien in elke kolom van 100*100 m ² , de chloride concentratie afneemt van zout (groter dan 1000 mg Cl/l) naar zoet (kleiner dan 150 mg Cl/l)).....	51
Figuur 25: Ruimtelijke verdeling van de gemiddelde chloride concentratie in de periode 1987-2007 in de Provincie Flevoland onderverdeeld in chloride klassen.....	52
Figuur 26: Ruimtelijke verdeling van de hevels en aanvoergebieden in de Provincie Flevoland.....	53

Figuur 27: Diepte grensvlak chloride 1000 mg/l en gemiddeld chloride gehalte oppervlakte water over periode (1987-2007).	54
Figuur 28: Oppervlaktewater kwaliteit in combinatie met infiltratie- en kwelfluxen.....	54
Figuur 29: Chloride concentratie en aanwezigheid van kleilagen in de ondergrond bij profiel 3a. De pijlen tonen de doordringing van zoute grondwater van onderaf, doordat weerstandslagen ontbreken of dieper in de ondergrond aanwezig zijn.	55
Figuur 30: Chloride concentratie en aanwezigheid kleilagen in de ondergrond bij profiel 6.	56
Figuur 31: Chloride concentratie en aanwezigheid kleilagen in de ondergrond bij profiel 12.	56
Figuur 32: Positie veldwerkcampagne: ten zuidwesten van Espel, Noordoostpolder.	59
Figuur 33: Locaties CVES metingen.	61
Figuur 34: Overzichtskaart met locaties te bemonsteren onttrekkingsputten.	62
Figuur 35: Overzichtskaart met locaties, a. nummer en b. exacte chloride concentratie in mg Cl-/l van de bemonsterde onttrekkingsputten.	64
Figuur 36: De T-EC prikstok in het veld.	65
Figuur 37: Verloop correctiefactor voor de EC van de prikstok.	66
Figuur 38: Chloride concentraties van het oppervlaktewater in een aantal tochten in het studiegebied, bemeten over de periode 20-27 juli 2007. Gebaseerd op deze resultaten is de CVES nabij Ankertocht gekozen.	67
Figuur 39: Binnen het gebruikte interval is er een sterke correlatie tussen chloride concentratie in mg Cl-/l en Elektrische geleidbaarheid EC in $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($1000 \mu\text{S}/\text{cm} = 1\text{mS}/\text{cm}$). Er lijkt één waarde af te wijken: het betreft putnummer 27; de afwijking kan verklaard worden door de bijzonder hoge concentraties van enkele overige gemeten ionen in deze put als NO_3 (35.39 ppm) en SO_4 (315 ppm) (1 ppm is ongeveer gelijk aan 1 mg/l).....	68
Figuur 40: Elektrische geleidbaarheid (EC in mS/cm) in het oppervlaktewater op 27 juli 2007 over een traject van 5 km. Relatieve afstand in noordelijke richting vanaf het punt X=[169879m, 524708m].	68
Figuur 41: Elektrische geleidbaarheid (EC in mS/cm) en temperatuurprofiel op een tweetal locaties in het oppervlaktewater.	68
Figuur 42: Resultaat 3D zoet-zout kartering op -6 en -9 m NAP	69
Figuur 43: Een Continue Verticale Elektrische Sondering (CVES).	69
Figuur 44: Empirische relatie tussen de elektrische weerstand en de chloride concentratie voor het watermonsters genomen in de putten in het studiegebied.....	71
Figuur 45: Locaties van de geo-elektrische meetlijnen, Noordoostpolder, Flevoland.....	72
Figuur 46: Geo-elektrische boorgatmeting 15H0055 (~4 km ten oosten van studiegebied).....	73
Figuur 47: Resultaat van de geo-elektrische meting nabij Ter Borgh's Hof (de lijn van 3 Ohm-m is geschatte diepte brak-zout grensvlak).	75
Figuur 48: Resultaat van de geo-elektrische meting Ankertocht (de lijn 3 van Ohm-m is geschatte diepte brak-zout grensvlak).	75
Figuur 49: Resultaat van de geo-elektrische meting Espelerpad 1 en 2, over de grondwateronttrekkingsput.	76
Figuur 50: Gesommeerde verlaging veroorzaakt door alle grondwateronttrekkingen in het watervoerend pakket.	81
Figuur 51: Voorbeeld van een conceptueel model waarmee het opkugelen van zout grondwater ('omhoog stromen van zout grondwater naar locaties van	

grondwateronttrekkingen') onder een onttrekking wordt berekend, b. verplaatsing van zoet-zout grensvlak onder een grondwateronttrekking als een functie van de tijd.....	82
Figuur 52: Afstand tussen filter onttrekking en diepte grensvlak 1000 mg CL-/l.	83
Figuur 53: Diepte van de bovenkant filter van de onttrekkingsput (m –mv) (bron: Grondwaterregister, Provincie Flevoland).....	83
Figuur 54: Mogelijke onttrekkingssituaties in het studiegebied van de Provincie Flevoland.	84
Figuur 55: Verhoging van het zoet-zout grensvlak aan de hand van de analytische vergelijkingen.	85
Figuur 56: Twee voorbeelden van doorlatendheidsprofielen (hydraulische conductiviteit) op de locatie van de onttrekking (figuur a is putnummer 518 met x-coördinaat 165820 en y-coördinaat 486810; figuur b is putnummer 24 met x-coördinaat 142800 en y-coördinaat 484250.).	86
Figuur 57: Chloride concentratie 3D in de Provincie Flevoland.	87
Figuur 58: Gemiddelde chloride verdeling bij respectievelijk alle beregeningsonttrekkingen, bronbemalingen en warmte koude opslag onttrekkingen.....	88
Figuur 59: Type 1 initiële chloride verdeling.	88
Figuur 60: Voorbeeld van chloride verdeling op de locatie van een onttrekking.	89
Figuur 61: Type 2 initiële chloride verdeling.	89
Figuur 62: Voorbeeld van chloride verdeling op de locatie van een onttrekking.	89
Figuur 63: Type 3 initiële chloride verdeling.	90
Figuur 64: Onttrekking berekening ondiep, (a) initiële chloride verdeling type 1 en respectievelijk geologie type 1, 2 en 3. (b) geologie type 2 en respectievelijk initiële chloride verdeling type 1 ('zout'), 2 ('zoet') en 3.	92
Figuur 65: (a) doorsnede van het 3D gebied: stijghoogte na 30 jaar van onttrekking beregeningsput ondiep met geologie type 1 en initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout'). (b) stroombanen in de buurt van de onttrekking. Voor dit scenario treedt verzoeting op.	92
Figuur 66: Onttrekking berekening diep, (a) chloride verdeling type 1 ('zout') en respectievelijk geologie type 1, 2 en 3. (b) geologie type 2 en respectievelijk initiële chloride verdeling type 1 ('zout'), 2 ('zoet') en 3. (c) Figuur 68(a) maar met een andere schaalverdeling.	93
Figuur 67: (a) doorsnede van het 3D gebied: stijghoogte na 30 jaar van onttrekking beregeningsput diep met geologie type 2 en initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout'). (b) stroombanen in de buurt van de onttrekking. Voor dit scenario treedt verzilting op.	93
Figuur 68: (a) ligging van de onttrekkingen in het boerencluster, de kleuren komen overeen met de onttrekkingen in Figuur 69b. (b) trendlijn van het verschil tussen de chloride concentratie in onttrekking boerencluster met initiële concentratieverdeling type 1 ('zout') en geologie type 2 en type berekening ondiep onder dezelfde initiële en geologische condities. De blauwe lijn toont de trend van het verschil voor de chloride concentratie in de middelste onttrekking van het cluster en de rode lijn voor het gemiddelde van de andere 8 onttrekkingen.....	94
Figuur 69: Scenario 4 met initiële chloride concentratie verdeling type 2 ('zoet') en geologie type 1 voor type onttrekking bronbemaling diep en scenario 9 met initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout').	94

Figuur 70: Schematisatie van van warmte koude opslag. In oktober tot en met april is er een onttrekking van 70 m ³ /uur van bron/put 2 naar bron/put 1 en in de maanden mei tot en met september is er een onttrekking van 110 m ³ /uur van bron/put 1 naar bron/put 2. De afstand tussen bron en put is 125 meter.....	95
Figuur 71: Stijghoogte voor het onttrekkingstype warmte-koude opslag voor geologie type 1 en type initiële chloride verdeling 1 ('zout'). (a) doorsnede van het testgebied na 30 jaar, (b) doorsnede van het testgebied na 30 jaar met de locatie van bron/put 1 en 2 en stroomlijnen en (c) stijghoogte in de onttrekking voor de eerste 5 jaar.....	96
Figuur 72: Chloride concentratie voor het onttrekkingstype warmte-koude opslag voor geologie type 1 en type initiële chloride verdeling 1 ('zout'): doorsnede van het testgebied na 30 jaar met stroomlijnen en de locaties van bron/put 1 en 2.....	97
Figuur 73: Chloride concentratie als functie van tijd voor beregeningsput diep, initiële chloride verdeling type 3 en geologietype 1 (scenario 12) voor verschillende onttrekkingsdebieten. Het huidige onttrekkingsdebiet is 80 m ³ /uur.	97
Figuur 74: Trends van de chloride concentratie als functie van tijd voor de komende 30 jaar voor beregeningsput diep, initiële chloride verdeling type 3 en geologietype 1 voor verschillende onttrekkingsdebieten. Het huidige onttrekkingsdebiet is 80 m ³ /uur.	98
Figuur 75: Invloed van de verschuiving van het scherpe zoet-zout grensvlak op de chlorideconcentratie in de onttrekking. Onttrekkingstype berekening diep ligt 80-110 meter –mv, geologie type 2. Voor verschillende diepten van het zoet-zout grensvlak is de chloride concentratie in deze onttrekking te zien.	98
Figuur 76: (a) Invloed van de verschuiving van het scherpe zoet-zout grensvlak op de chloride concentratie in de onttrekking; huidige situatie en situatie na 30 jaar. Onttrekkingstype berekening diep en geologietype 2. (b) voorbeeld voor de chloridenorm van 1000 mg/liter: om deze norm te halen moet het zoet-zout grensvlak initieel dieper liggen dan 120 meter voor beregeningsput diep.	99
Figuur 77: Stappenschema risico-analyse putlocaties.....	102
Figuur 78: Mogelijke onttrekkingssituaties in het studiegebied van de Provincie Flevoland.	103
Figuur 79: Risico-analyse voor putlocaties uitgaande van chloride grensvlak van 500 mg/l, 1000 mg/l en 2000 mg/l.	105
Figuur 80: Groene gebieden geven aan dat aldaar een slechtdoorlatende laag aanwezig is boven het grensvlak (500, 1000 en 2000 ml Cl ⁻ /l, respectievelijk).....	107
Figuur 81: Dikte van de slechtdoorlatende laag die aanwezig is boven het grensvlak (500, 1000 en 2000 ml Cl ⁻ /l, respectievelijk).	108
Figuur 82: Risico-analyse uitgaande van chloridegrensvlak van 500 mg/l voor onttrekkingsdiepte van 20, 40 en 60 m.	110
Figuur 83: Risico-analyse uitgaande van chloridegrensvlak van 1000 mg/l voor onttrekkingsdiepte van 20, 40 en 60 m.	111
Figuur 84: Risico-analyse uitgaande van chloridegrensvlak van 2000 mg/l voor onttrekkingsdiepte van 20, 40 en 60 m.	112
Figuur B1 Ruimtelijke verdeling van de chloride concentratie in de periode 1915-2005 in de Provincie Flevoland onderverdeeld in chlorideklassen volgens tabel B3 op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b).	3
Figuur B2 Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de gecombineerde grondwaterput B26A0018 & B26A0038.	4

Figuur B3	Ruimtelijke verdeling van de tijdreeksen chloride voor de bepaling van verzoeting en verzilting voor de periode 1915-2005 in de Provincie Flevoland op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b). De chloridetijdreeksen zijn onderverdeeld in klassen volgens tabel B4.....	5
Figuur B4	Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de grondwaterput B26G0091.	6
Figuur B5	Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de grondwaterput B15H0001.	7
Figuur B6	Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de grondwaterput B21B0014.	7
Figuur B7	Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de gecombineerde grondwaterput B25H0118 & B25H0148.	8
Figuur B8	Ruimtelijke verdeling van de uitwisseling van natrium voor de bepaling van verzoeting en verzilting voor de periode 1970-2005 in de Provincie Flevoland op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b). De uitwisseling van natrium is onderverdeeld in klassen volgens tabel B5.	10
Figuur B9	Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen (a) en de uitwisseling van natrium in 1980 voor grondwaterput B25F0072 (b).	11
Figuur K1	Diepte onttrekkingsput (m).	1
Figuur K2	Pompcapaciteit van de onttrekkingsput.	1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het Omgevingsplan Flevoland 2006 is het grondwaterbeleid naar aanleiding van het Drinkwatervoorzieningsplan en Kaders voor GGOR (Gewenst Grond- en Oppervlaktewater Regime) aangepast. Door verschillende ontwikkelingen is het waarschijnlijk dat in 2009, bij de herziening van het omgevingsplan voor het Stroomgebiedsbeheersplan van de Kaderrichtlijn Water, aanvullende wijzigingen in het grondwaterbeleid nodig zijn.

Het project Onderbouwing Grondwaterbeleid 2009 moet de basis bieden voor een concreet, realistisch en afrekenbaar grondwaterbeleid. Het project is gestart met een definitiestudie (Grontmij, 2006) waarin de beleidsopgaven en de leemtes in kennis zijn geïnventariseerd. Bovendien zijn de belangrijkste knelpunten voor het grondwaterbeheer geïnventariseerd. Er is in deze definitiestudie voorgesteld twee basisstudies uit te voeren:

1. Een studie die meer inzicht moet geven in de effecten van onttrekkingen voor een duurzaam grondwaterbeheer, toegespitst op de zoete grondwatervoorkomens;
2. Een studie die ingaat op de kwetsbaarheden van het grondwatersysteem voor verontreinigingen.

Deze, onderhavige, Deltares rapportage betreft de eerste studie, terwijl de tweede studie parallel door Grontmij is uitgevoerd.

Op basis van de uitkomsten van beide basisstudies stelt de provincie beleidsnotities op waarin politieke keuzes, gevolgen voor betrokkenen, instrumentering en maatregelenpakketten staan beschreven. De beleidsnotities vormen de basis voor het politiek-maatschappelijke proces in het kader van de omgevingsplanherziening 2009.

Relevant voor de basisstudie Zoet-zout Grondwater Provincie Flevoland zijn:

- ♦ *De eisen van de Kaderrichtlijn Water met betrekking tot grondwater;*
De Kaderrichtlijn Water streeft naar een duurzame exploitatie van het grondwater. Er dient een evenwicht te zijn tussen onttrekking en de aanvulling van de grondwatervoorraad, dat grondwateronttrekkingen geen significante schade toebrengen aan terrestrische ecosystemen die rechtstreeks van het grondwaterlichaam afhankelijk zijn, en dat er geen intrusie van zout water optreedt. Praktijkervaring wijst op de kwetsbaarheid van de zoete grondwatervoorkomens in Flevoland; onttrekkingsputten verzilten vaak.
De Kaderrichtlijn Water maakt bij grondwaterwinningen voor menselijke consumptie geen onderscheid tussen drinkwaterwinningen en industriële winningen voor levensmiddelen. Op dit moment zijn er in de provincie uitsluitend drinkwaterwinningen, maar het is goed mogelijk dat ook levensmiddelenindustrieën voor bier of frisdrank zich in de provincie zullen vestigen. De provincie overweegt hiervoor een beleidskader op te stellen om hierop adequaat te kunnen anticiperen.
- ♦ *De wens om te kunnen sturen in ruimtelijke ontwikkelingen;*
Het belangrijkste landgebruik in de Provincie Flevoland is landbouw. Er zijn ontwikkelingen die verschuivingen in het gebruik met zich meebrengen. Dit zijn de stedelijke uitbreidingen rond Almere, de compensatie voor de Vogel- en Habitat Richtlijn van buitendijkse inrichtingen in de vorm van binnendijks in te richten natuurgebieden, de gewenste ontwikkeling van landgoederen in Oostelijk en Noordelijk Flevoland en veranderingen binnen de landbouw (uitbreiding veeteelt en bloembollenteelt versus extensivering akkerbouw). Inbreng van kennis over het

grondwatersysteem bij de advisering over deze ontwikkelingen is noodzakelijk voor de bescherming van zoete grondwatervoorraden, maar ook voor het benutten van de kansen die het grondwater biedt voor ontwikkeling.

- ♦ *Het bereiken van een betere afstemming tussen grond- en oppervlaktewatergebruik.* De provincie wil een betere afstemming tussen het gebruik van grondwater en het gebruik van oppervlaktewater. Hiervoor is inzicht nodig in de zoete grondwatervoorkomens en de mogelijkheden voor duurzame exploitatie van deze voorraden.

Resumerend kan gesteld worden dat:

De Provincie Flevoland heeft behoefte aan een basisstudie waarin inzicht wordt gegeven over de effecten van grondwateronttrekkingen op de ontwikkeling van de zoete grondwatervoorraden.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van de studie luidt:

Het beschikbaar maken en stellen van kennis ten behoeve van strategieontwikkeling voor duurzame exploitatie van het zoete grondwater, het grondwaterbeleid en -beheer, ruimtelijke ordeningsprocessen en afstemming tussen grondwatergebruik en oppervlaktewatergebruik.

Definitie Duurzaam Winbare Hoeveelheid Zoet Grondwater

De provincie is bij het opstellen van het drinkwatervoorzieningenplan (Provincie Flevoland, 2005) tot een definitie gekomen van de duurzaam winbare hoeveelheid zoet grondwater:

“De duurzaam winbare hoeveelheid zoet grondwater is de hoeveelheid waarbij als gevolg van grondwateronttrekkingen, ook op langere termijn, de voorraad zoet grondwater niet kleiner wordt, geen verzilting optreedt en geen onaanvaardbare effecten op de omgeving worden veroorzaakt”

De doelstelling kan verder worden onderverdeeld in verscheidene subdoelen:

- De studie moet de systeemkennis vergroten en ontsluiten;
- De studie ‘*Zoet-zout Grondwater Provincie Flevoland*’ moet de basis leveren voor de strategieontwikkeling voor een duurzame exploitatie van het zoete grondwater in Flevoland met uitzondering van het grondwater in het derde watervoerende pakket in Zuidelijk Flevoland bestemd voor de openbare drinkwatervoorziening (zie hiervoor het Drinkwatervoorzieningenplan Flevoland);
- Op basis van de ontwikkelde inzichten worden de kansen en risico’s voor de exploitatie van de zoete grondwatervoorkomens in beeld gebracht;
- De studie moet zo veel mogelijk een kwantitatief inzicht geven in de draagkracht van het systeem voor exploitatie. Bij het bepalen van de draagkracht van het systeem worden de effecten op het grondwatersysteem en op de omgeving betrokken;
- De resultaten van de studie moeten ontsloten worden voor gebruikers en overheden. De kennis wordt toegankelijk gemaakt voor beleid en beheer, maar daarnaast ook voor gebruikers van het grondwatersysteem.

Kernvragen in dit onderzoek zijn:

1. Waar zijn winbare zoete grondwatervoorraden?
2. Hoe zijn deze voorraden ontstaan, en hoe worden de voorraden aangevuld?

3. Hoe ontwikkelen de voorraden zich (verzoeting/verzilting)?
4. Hoe kunnen de voorraden duurzaam worden geëxploiteerd?
5. Hoe kan de opgedane kennis goed worden ontsloten voor gebruikers?

Naast het ontwikkelen van kennis is ook de ontsluiting daarvan van belang. Niet alleen voor het waterschap en de provincie voor de uitoefening van hun taken, maar ook voor de gebruikers van het grondwatersysteem. Dit schept meer vertrouwen en draagvlak voor het beleid.

1.3 Afbakening

De kennis wordt ingezet voor het grondwaterbeleid en -beheer, maar is daarnaast nodig voor ruimtelijke ordeningsprocessen (lagenbenadering) en bij de afstemming tussen grondwater- en oppervlaktewatergebruik bij het voldoen aan de waterbehoefte (agrarisch / industrieel).

Waar het drinkwatervoorzieningsplan gericht was op het ontwikkelen van een exploitatiestrategie voor het diepe zoete grondwater in de reserveringszone ten bate van de openbare drinkwatervoorziening in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland, is deze studie gericht op het overige grondwater in Flevoland.

1.4 Aanpak

Om de doelstelling in paragraaf 1.2 te bereiken heeft Deltares het zoet-zout onderzoek onderverdeeld in een vijftal delen:

1. een uitgebreide (grond)watersysteem analyse om de systeemkennis te vergroten, bestaande uit a. de geohydrologische opbouw van de ondergrond en de kartetring van de deklaag (hoofdstuk 2), b. de oorsprong en het vóórkomen van zoet-brak-zout grondwater aan de hand van een paleohydrogeografische analyse (hoofdstuk 3), en c. de beschrijving van het watersysteem (hoofdstuk 4);
2. een ruimtelijke verdeling van zoet-brak-zout grondwater aan de hand van (indirecte) waarnemingen van chloride concentraties (hoofdstuk 5);
3. een meetcampagne in een deelgebied in de Noordoostpolder om de mate van verzilting in de ondergrond te verifiëren (hoofdstuk 6);
4. een 3D numerieke zoet-zout modellering om de draagkracht van het zoet-zout grondwatersysteem voor exploitatie nader te bepalen (hoofdstuk 7); en tenslotte
5. een integrale analyse om, door combinatie van bovenstaande activiteiten, te komen tot een risico kaart voor toekomstige exploitatie ten behoeve van strategieontwikkeling (hoofdstuk 8).

Conclusies (hoofdstuk 9), literatuurlijst en bijlagen complementeren deze Zoet-zout Studie Provincie Flevoland.

2 Geohydrologische opbouw van de ondergrond

2.1 Inleiding

De opbouw van de ondergrond heeft een grote invloed op het huidige grondwatersysteem, zowel de kwantitatieve grondwaterstromen als de zoet-zout verdeling in de ondergrond. In dit hoofdstuk zal de geohydrologische opbouw worden besproken waarbij de opbouw van de Holocene deklaag in groter detail wordt behandeld. De deklaag heeft namelijk een sterke invloed op het ondiepe grondwatersysteem waaronder het optreden van kwel en de relatie tussen het oppervlaktewater en het grondwater.

2.2 Geohydrologische schematisatie

In Figuur 1 is de geologische en geohydrologische opbouw van de ondergrond weergegeven, in Bijlage A is de verbreiding en dikte van de verschillende lagen weergegeven. In Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en de Noordoostpolder zijn drie goed doorlatende watervoerende pakketten te onderscheiden met daaronder een matig doorlatend vierde watervoerend pakket. Deze goeddoorlatende lagen zijn zandig en worden gescheiden door slecht doorlatende lagen, die voornamelijk uit kleilagen zijn opgebouwd.

De slecht doorlatende basis bestaat uit kleiige afzettingen van de Formaties van Maasluis, Oosterhout en Breda en Kiezeloöliet en ligt op een diepte van ongeveer 170 tot 250 meter diepte.

De fijne en grove zanden van de Formatie van Peize-Waalre en de zandige afzettingen binnen de Formatie van Maassluis behoren tot het vierde watervoerende pakket (WVP4).

Gezien de geringe dikte van WVP4 is de betekenis voor het grondwatersysteem nihil. Boven WVP4 ligt de derde scheidende laag 3 (SDL 3) en wordt – met uitzondering van de uiterste zuidpunt van de Flevopolder- in het gehele gebied aangetroffen en bestaat uit kleilagen van de Formatie van Peize-Waalre. De minimale dikte is 20 meter en gezien de geringe betekenis van WVP4 zou SDL3 als geohydrologische basis kunnen worden gezien.

Op het SDL3 ligt het derde watervoerend pakket (WVP3) en bestaat uit matig grove tot zeer grove zanden en grind van de Formatie van Peize-Waalre. De dikte varieert van ongeveer 80 tot 100 meter en is goeddoorlatend. Direct op WVP3 ligt het WVP2b, SLD2b is in het gebied nagenoeg afwezig.

Op deze watervoerende pakketten ligt de scheidende laag SDL2a die wordt gevormd door de bekkenklei van de Formatie van Drente en komt voornamelijk in het zuidwestelijk deel van Flevoland voor. Tijdens het Salien, de één na laatste ijstijd, heeft het ijs een diep bekken uitgeschuurd en er opgestuwd kleimateriaal afgezet. Het materiaal uit dit bekken en materiaal dat het ijs uit noordelijke richting heeft meegenomen, zijn als eindmorene afgezet en vormen nu de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug.

In de periode daarna zijn riviersedimenten afgezet die het dunne watervoerende pakket WVP2a vormen. Doordat de tweede scheidende laag (zowel SLD 2a als SLD2b) in de Noordoostpolder bijna niet voorkomt, vormt het tweede en derde watervoerend pakket hier één watervoerend pakket.

Het glaciële bekken in zuidwest-Flevoland werd gedurende het Eemien verder opgevuld met mariene kleien en na terugtrekking van de Eemzee is veen afgezet (Formatie van Woudenberg). Deze eerste scheidende laag (SDL 1) is in dit deel van Flevoland goed ontwikkeld en is van grote betekenis voor de zoet-zout verdeling in de ondergrond (zie hoofdstuk 3).

De afzettingen boven de eerste scheidende laag bestaan uit fijne tot matig grove zanden van de Formaties van Boxtel en Kreftenheye en vormen het eerste watervoerend pakket (WVP1).

Het eerste watervoerende pakket wordt afgesloten door de Holocene deklaag. In de volgende paragraaf wordt hier nader op in gegaan.

Definitie Geohydrologisch Model Flevoland				
Geologische eenheid Formatie / Laagpakket	Hydrogeologische eenheid	Aanwezigheid		Geohydrologische eenheid
		Flevoland	+5km	
Antropogeen + Holocene (Naaldwijk, Nieuwkoop, Echteld)	HL-C			Deklaag (DKL)
Boxtel	BX-z-1			Watervoerend pakket 1 (WVP1)
	BX-k-1			
	BX-z-2			
	BX-k-2			
Kreftenheye (/ Wijchen)	BX-z-3			Slecht doorlatende laag 1 (SDL1)
	KR-z-1			
	KRWY-k-1			
	KR-z-2			
Beegden (/ Rosmalen)	KR-k-1			
	KR-z-3			
	BE-z-1			
	BERO-k-1			
gecombineerde Eem en Woudenberg	BE-k-1			
	BE-z-2			
	WB-z-1			
	WB-k-1			
Kreftenheye (/ Zutphen, / Twello)	EE-z-1			Watervoerend pakket 2a (WVP2a)
	EE-k-1			
	EE-z-2			
	EE-k-2			
Drente (/ Uildam, / Gieten)	EE-z-3			Slecht doorlatende laag 2a (SDL2a)
	EE-k-2			
	EE-z-3			
	KR-z-4			
gecombineerde gestuwde afzettingen	KRZU-k-1			Watervoerend pakket 2b (WVP2b)
	KR-z-5			
	KRTW-k-1			
	KR-z-6			
Boxtel / Drachten	DR-z-1			Slecht doorlatende laag 2a (SDL2a)
	DRUI-k-1			
	DR-z-2			
	DRZU-k-1			
Urk (/ Tynje)	DR-z-3			Slecht doorlatende laag 2b (SDL2b)
	DT-C			
	DN-z-1			
	UR-z-1			
Peelo	UR-k-1			
	UR-z-2			
	UR-k-2			
	UR-z-3			
Urk (/ Veenhuizen)	PE-z-1			
	PE-k-1			
	PE-z-2			
	PE-k-2			
Sterksel	PE-z-3			
	UR-z-4			
	UR-k-3			
	UR-z-5			
Appelscha	ST-z-1			Watervoerend pakket 3 (WVP3)
	ST-k-1			
	ST-z-2			
	AP-z-1			
Stramproy	SY-z-1			Slecht doorlatende laag 3 (SDL3)
	SY-k-1			
	SY-z-2			
	SY-k-2			
gecombineerde Peize en Waalre	SY-z-3			Watervoerend pakket 4 (WVP4)
	SY-k-3			
	SY-z-4			
	PZWA-z-1			
Maassluis	WA-k-1			Geohydrologische basis (GHB)
	PZWA-z-2			
	WA-k-1			
	PZWA-z-3			
Kiezeloöiet	WA-k-2			
	PZWA-z-4			
	PZ-k-1			
	PZWA-z-5			
Oosterhout	WA-k-3			
	PZWA-z-6			
	WA-k-4			
	PZWA-z-7			
Breda	PZ-k-2			
	PZWA-z-8			
	MS-z-1			
	MS-C			
Breda	MS-k-1			
	MS-z-2			
	MS-k-2			
	MS-z-3			
Breda	KI-z-1			
	KI-k-1			
	KI-z-2			
	KI-k-2			
Breda	KI-z-3			
	KI-k-3			
	KI-z-4			
	OO-z-1			
Breda	OO-C			
	OO-k-1			
	OO-z-2			
	OO-k-2			
Breda	OO-z-3			
	BR-z-1			
	BR-k-1			
	BR-z-2			

Legenda hydrogeologische eenheden	
	kleine, venige of complexe eenheid
	zandige eenheid
	niet geparametriseerde eenheid

Legenda geohydrologische eenheden	
	Slecht doorlatende lagen
	Watervoerende pakketten
	niet geparametriseerde eenheid

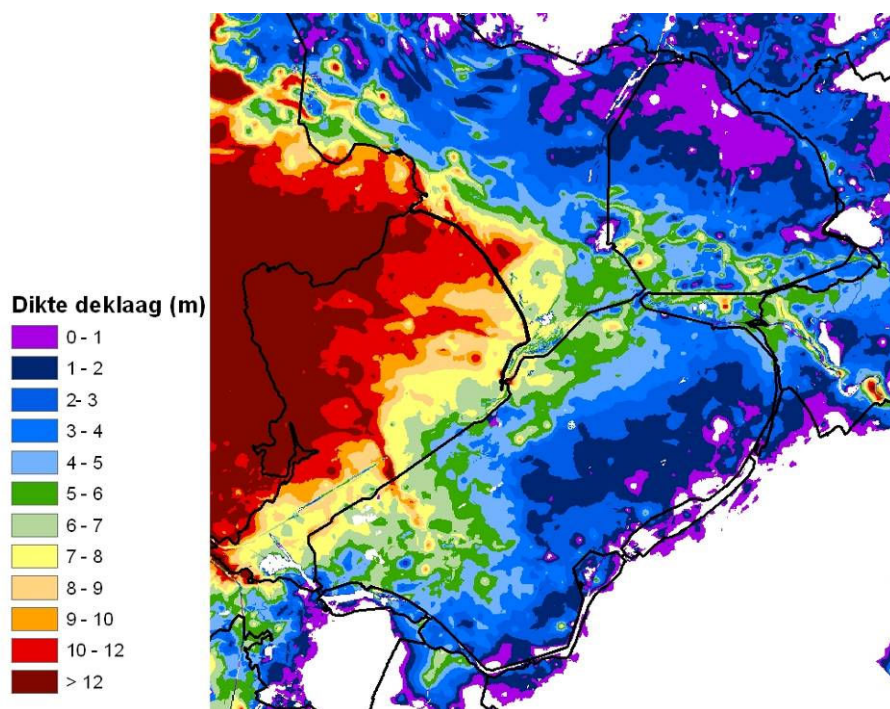
Figuur 1: De geologische, geohydrologische en hydrogeologische opbouw van de ondergrond van Flevoland.

2.3 Kartering van de deklaag

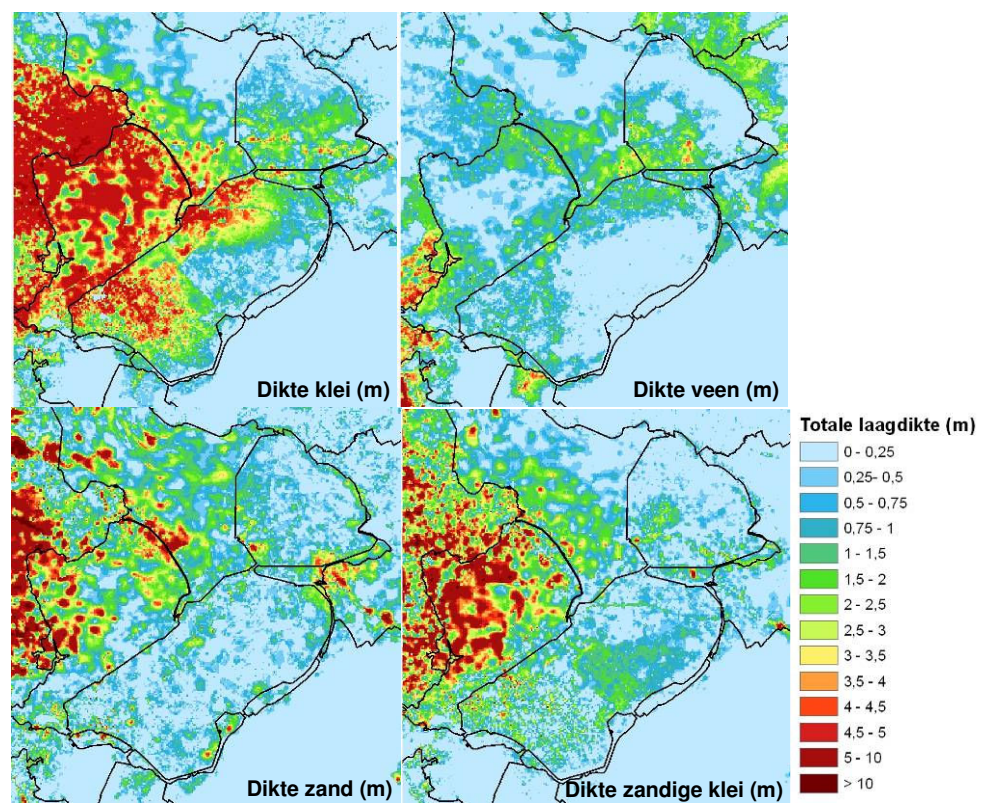
Voor het bepalen van de kwel- en infiltratiesnelheden door de deklaag is het van groot belang om inzicht te verkrijgen in de karakteristieken van de deklaag. Alle ondiepe boringen uit de DINO-database zijn betrokken voor een ruimtelijk beeld van de samenstelling van de Holocene deklaag van de Provincie Flevoland. Deze informatie geeft niet de opeenvolging van verschillende lithologische laagjes weer maar geeft de totale dikte van het voorkomen van veen, klei en zand in de deklaag weer. Op deze manier kan een redelijke schatting worden gemaakt van de weerstand van de deklaag die van belang is voor de stroming door de deklaag (kwel-infiltratie).

De deklaag is in de noordelijke helft van de Noordoostpolder zeer dun tot vrijwel afwezig, maar neemt qua dikte naar het zuiden toe (Figuur 2). Langs de oostelijke randen van Oostelijk en Zuidelijk Flevoland is de deklaag ook erg dun; hier neemt in noordwestelijke richting de dikte van de deklaag toe. In het westelijk deel van Zuidelijke Flevoland komen zelfs dikten van meer dan 10 meter voor. De deklaag bestaat hier voornamelijk uit klei afgewisseld met dunne veenlagen (Figuur 2). De aanwezigheid van zand is zeer lokaal, evenals in de rest van Flevoland en de Noordoostpolder.

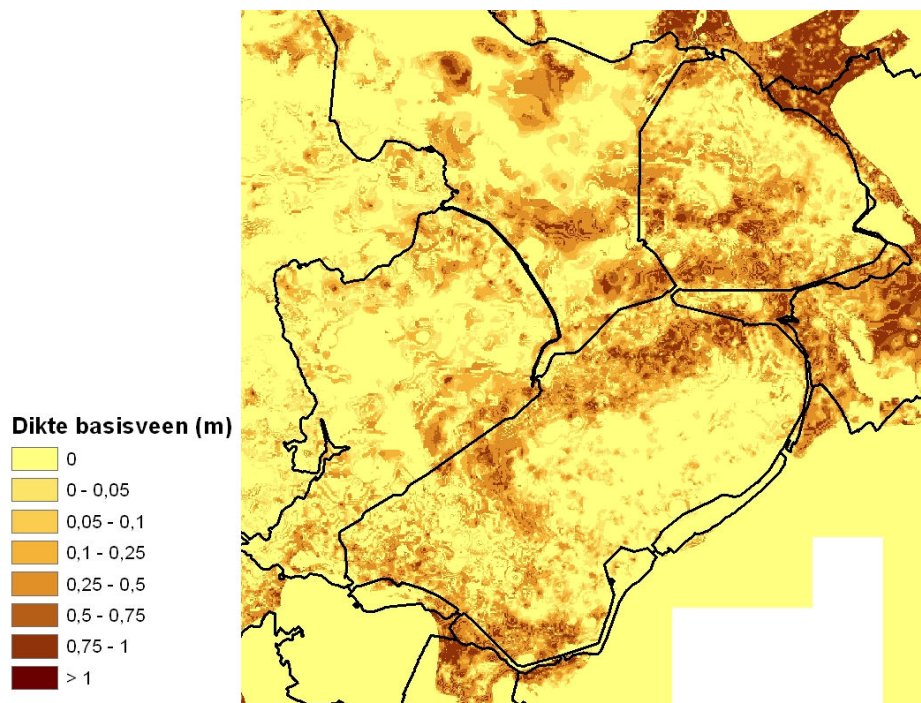
Opvallend in het zuidwestelijk deel van Zuidelijk Flevoland is de ligging van de 'oude' Pleistocene geul. Deze is duidelijk waarneembaar door de toename in deklaagdikte wat een opvulling van de geul weerspiegelt.



Figuur 2: Dikte van deklaag (in m)

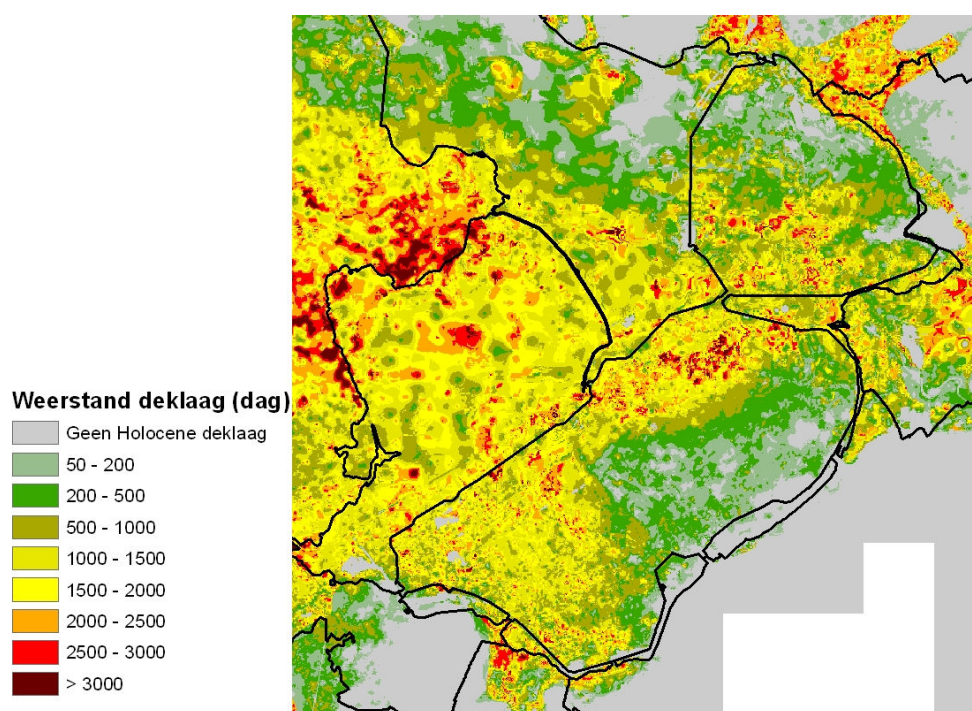


Figuur 3: Dikte van de Holocene deklaag (m)



Figuur 4: Dikte van basisveen (m).

Binnen Flevoland en de Noordoostpolder zijn de verschillen in verticale weerstand (c-waarden) van de deklaag vrij groot: van 50-500 dagen in het oostelijk deel Oostelijk Flevoland en het noordelijk deel van Noordoostpolder tot meer dan 2000 dagen in het noorden van Oostelijk Flevoland. Deze verschillen zijn grotendeels te verklaren op basis van de dikte van de Holocene deklaag en dikte van het basisveen. Naarmate de dikte van het basisveen en van het gehele Holocene pakket toeneemt, wordt de verticale weerstand in het algemeen hoger, en vice versa. Dit is goed zichtbaar bij een vergelijking van Figuur 4 en Figuur 5. In de drie delen met de laagste verticale weerstand (gelegen in Oostelijk Flevoland en het noordelijk deel van de Noordoostpolder) (Figuur 5) is de basisveenlaag en de deklaag het dunst (Figuur 4). Naast de dikte van het basisveen en gehele Holocene pakket is tevens de samenstelling van de deklaag van belang. De weerstand neemt toe naarmate er meer klei in het pakket aanwezig is en minder zand en grind.

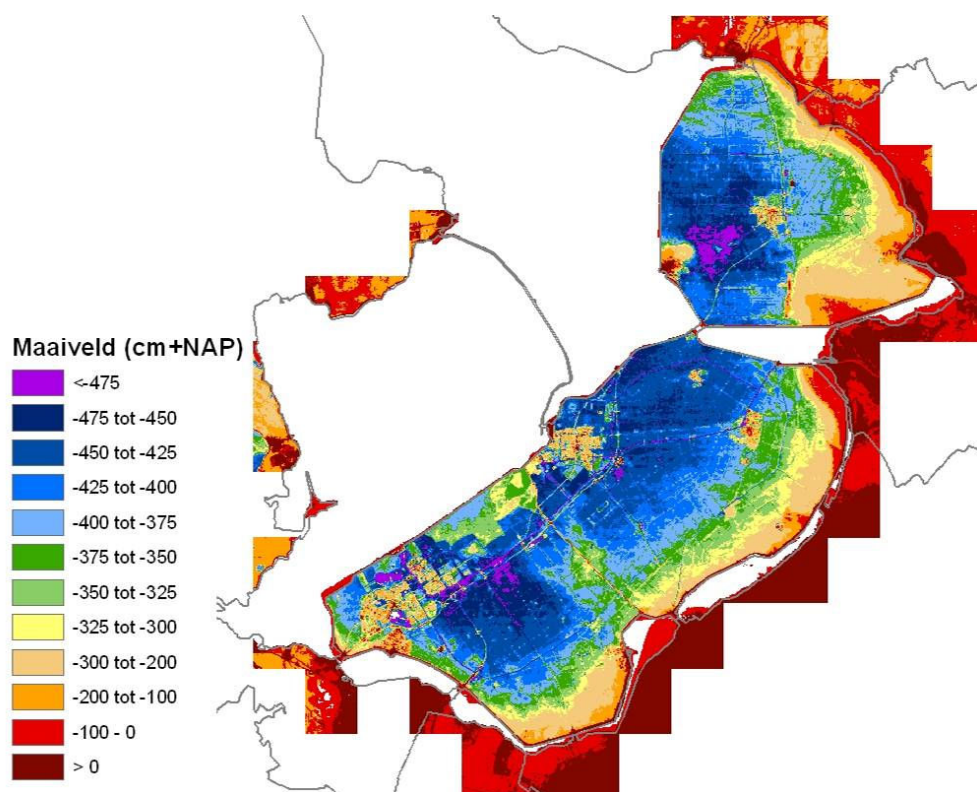


Figuur 5: Verticale weerstand van de deklaag (dagen).

2.4 Actuele hoogteligging

De actuele hoogteligging van Flevoland en de Noordoostpolder is in Figuur 6 weergegeven. Vanuit het oostelijk naar het westelijk deel is er is een duidelijke afname in hoogteligging zichtbaar (van ongeveer NAP tot 5 m onder NAP). De laagste delen liggen in zuid Flevoland en het zuidwesten van de Noordoostpolder.

Wanneer de huidige verschillen in hoogteligging vergeleken worden met de hoogteverschillen van het Pleistocene oppervlak (Figuur 9), is duidelijk zichtbaar dat de helling van het oppervlak in de loop der tijd is afgenomen door afzettingen tijdens het Holoceen. Wel blijft ondanks deze afvlakking van het reliëf, de ligging van de Pleistocene geul nog steeds duidelijk waarneembaar als een verlaging in het zuidwestelijk deel van Flevoland.



Figuur 6: Actuele hoogteligging Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en Noordoostpolder (AHN).

3 Paleohydrogeografische ontwikkeling

3.1 Inleiding

Een verklaring voor het wijd verbreide voorkomen van brak en zout grondwater in de Provincie Flevoland moet worden gezocht in het verleden. De volgende paleohydrogeografische analyse hiertoe zal gebruikt worden om te bepalen uit welke periode(n) het zoute grondwater stamt en op welke manier het zoute grondwater in de watervoerende pakketten terecht is gekomen.

3.2 Paleohydrogeografische ontwikkelingen

De Pleistocene ondergrond van de IJsselmeerpolders bestaat voor het grootste deel uit rivierafzettingen die zijn afgezet met zoet water. Deze afzettingen zijn afgezet in vlakke landschappen. Afzettingen die onder zoute tot brakke omstandigheden werden gevormd vormen de uitzonderingen. Dit zijn: de Eem Formatie en delen van de Holocene serie. Voordat de Eemzee het gebied binnen drong heeft het landijs het reliëf zeer sterk veranderd: zeer diepe bekkens werden gevormd onder Flevoland en gelijktijdig ontstonden de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe. Hierdoor konden sterke grondwatergradiënten ontstaan.

3.2.1 *Pleistoceen*

3.2.1.1 *Vroeg-Pleistoceen*

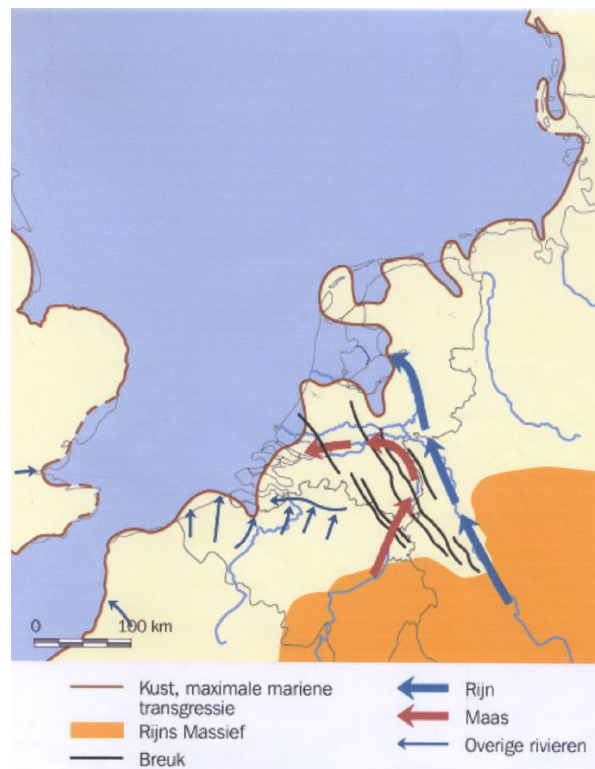
In het Vroeg-Pleistoceen toen de Noordzee vrijwel geheel Nederland bedekte zijn mariene sedimenten afgezet die behoren tot de Formatie van Maassluis en bevinden zich op een diepte van 150 – 200 m – NAP. Ten tijde van hun afzetting hebben ze zout water bevat.

Meinardi (1973) verklaarde het voorkomen van zout grondwater in de watervoerende pakketten boven deze mariene afzettingen door te veronderstellen dat er opwaarts transport van zout had plaatsgevonden gedurende de 2 miljoen jaar die het Pleistoceen duurde. Hoewel het proces dat hij veronderstelt ongetwijfeld heeft plaatsgevonden, is dit model te eenvoudig in conceptuele zin. Zo ontbreekt in dit model de invloed van sedimentatie- en erosie en wordt geen rekening gehouden met latere zeespiegelvariaties en ijstijden. Bovendien is de huidige verdeling van zoutgehalten met de diepte in tegenspraak met de veronderstelling dat het zoute grondwater afkomstig zou zijn uit de Vroeg-Pleistocene mariene afzettingen. Het zoute grondwater (in afzettingen jonger dan de Formatie van Maassluis) in Flevoland heeft dan ook niets te maken met de aanwezigheid van de Noordzee aan het begin van het Pleistoceen.

Op de vol mariene afzettingen (Formatie van Maassluis) ligt het Laagpakket van Balk (Vroeg-Pleistoceen: Laat Tiglien: 2.0 - 1.75 miljoen jaar geleden). Deze eenheid bestaat uit klei-zand gelaagd pakket van ongeveer 20m dik. De top komt voor op variabele diepte, in het oosten variërend tussen 130m bij Roggebotsluis en 170m bij Harderwijk. Bij Naarden en Urk bevindt deze zich op 180m, respectievelijk 170m.

Het afzettingmilieu, is een complex van facies die voorkomen in de kustvlakte: estuaria, getijde rivieren, en mariene lagen. Organische lagen komen spaarzaam voor. Hieruit blijkt dat de mariene kant van de kustvlakte domineerde.

De periode van vorming omvat het Laat Tiglien (2- 1.75 miljoen jaar geleden), een periode waaruit ook sterke zeespiegel variaties bekend zijn, dus periodiek optreden van continentale condities. Deze zijn gepreserveerd als perioden van non-depositie, maar zorgden wel voor (gedeeltelijke) verzoeting.

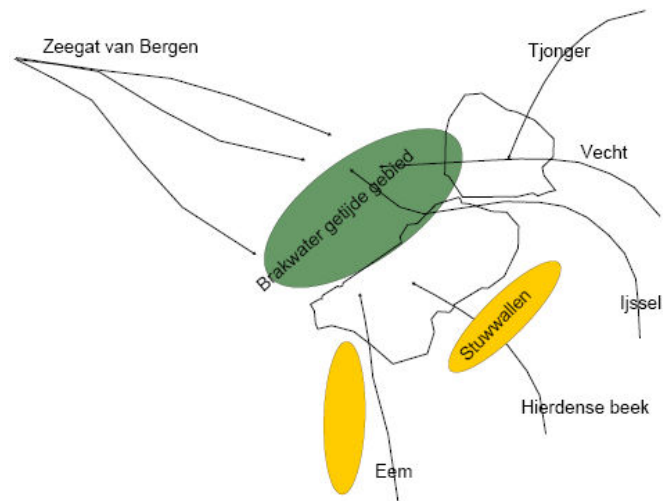


Figuur 7: De verbreiding van de Eemzee ongeveer 130.000 jaar geleden.

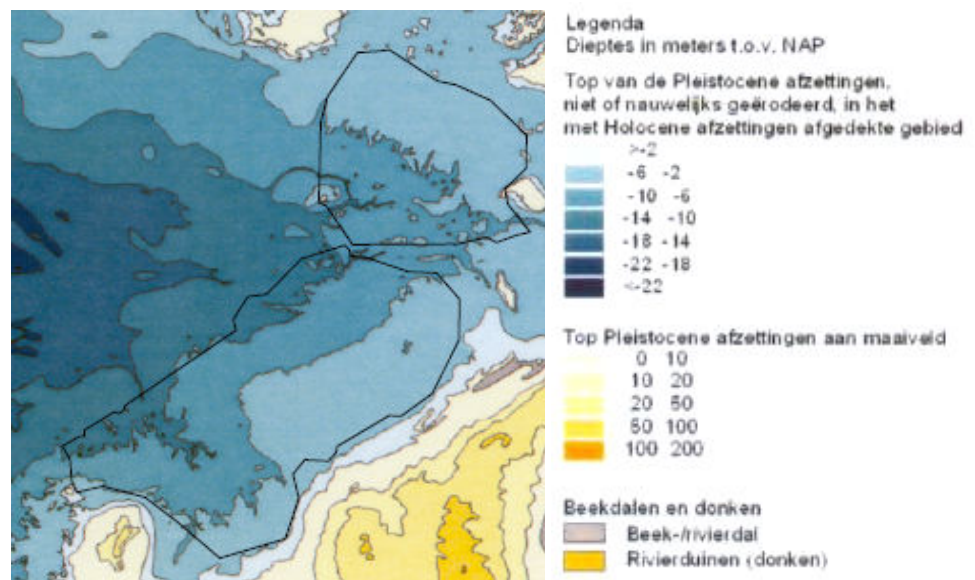
3.2.1.2 Eem

Gedurende een periode van ongeveer 6000 jaar van het Eemien (rond 130.000 jaar geleden) vormde het huidige IJsselmeergebied een randzee of zoute lagune (Figuur 7). Tussen Urk - Emmeloord en de noordrand van oostelijk Flevoland bestond een landgebied. Ten noorden van de lijn Urk-Emmeloord-Vollenhove mondde de Rijn in deze zee uit. Dus de ondergrond van de noordelijke helft van de Noordoostpolder bestond in die tijd uit estuaria.

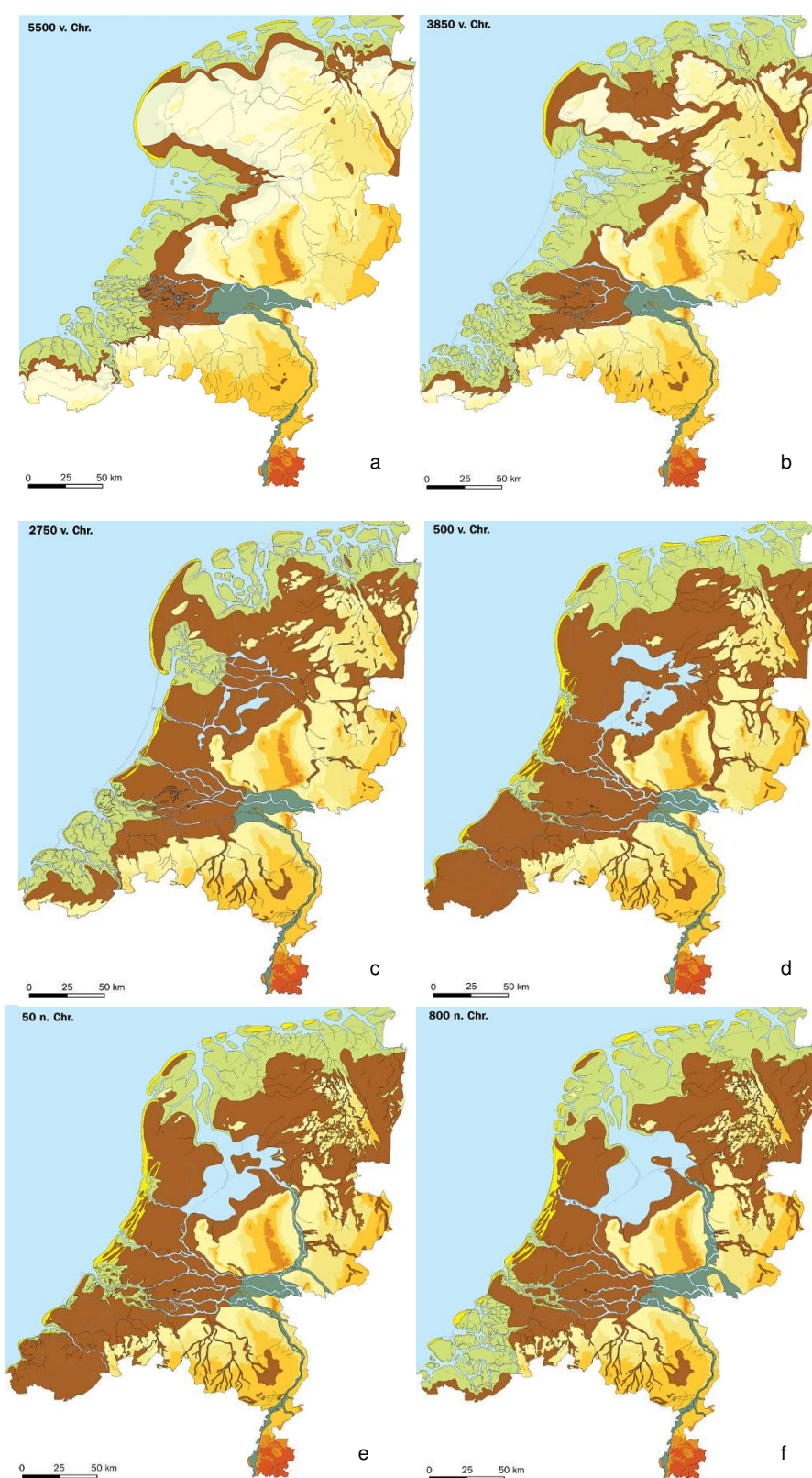
Er zijn geen meetgegevens beschikbaar om te bepalen hoeveel zout water uit die periode nog in de ondergrond aanwezig is. De reden hiervoor is dat zoutwatervoorcomens van verschillende ouderdom hydrochemisch erg moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn. Doorgaans wordt verondersteld dat tijdens het Weichsel glaciaal, de koude periode die volgde op het Eem, de doorspoeling van de ondergrond met geïnfiltrerd zoet water, voldoende is geweest om al het zout uit te spoelen. Deze veronderstelling is echter nooit getoetst met modellen of veldgegevens. Bovendien, complicaties als het bevriezen van de ondergrond tijdens het koude Weichsel en het voorkomen van slecht doorlatende pakketten, zullen de doorspoeling sterk gehinderd hebben. Het is dus niet uitgesloten dat overblijfselen van zeewater uit deze periode nog te vinden zijn. Als dit zo is gaat het om de diepere voorkomens, d.w.z. in en of onder de mariene sedimenten van de Eem Formatie.



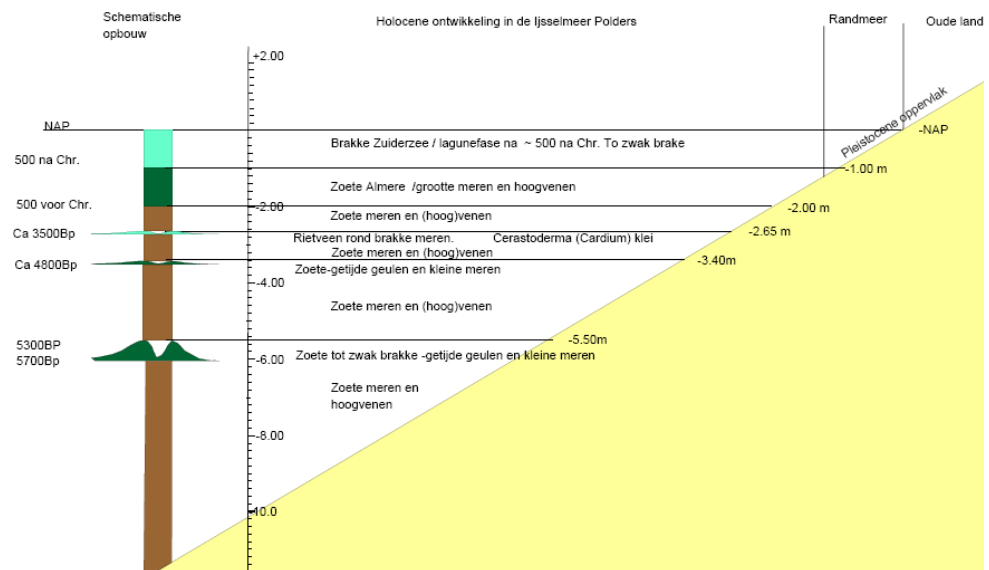
Figuur 8: Ligging van rivier- en beeklopen tijdens het Holoceen.



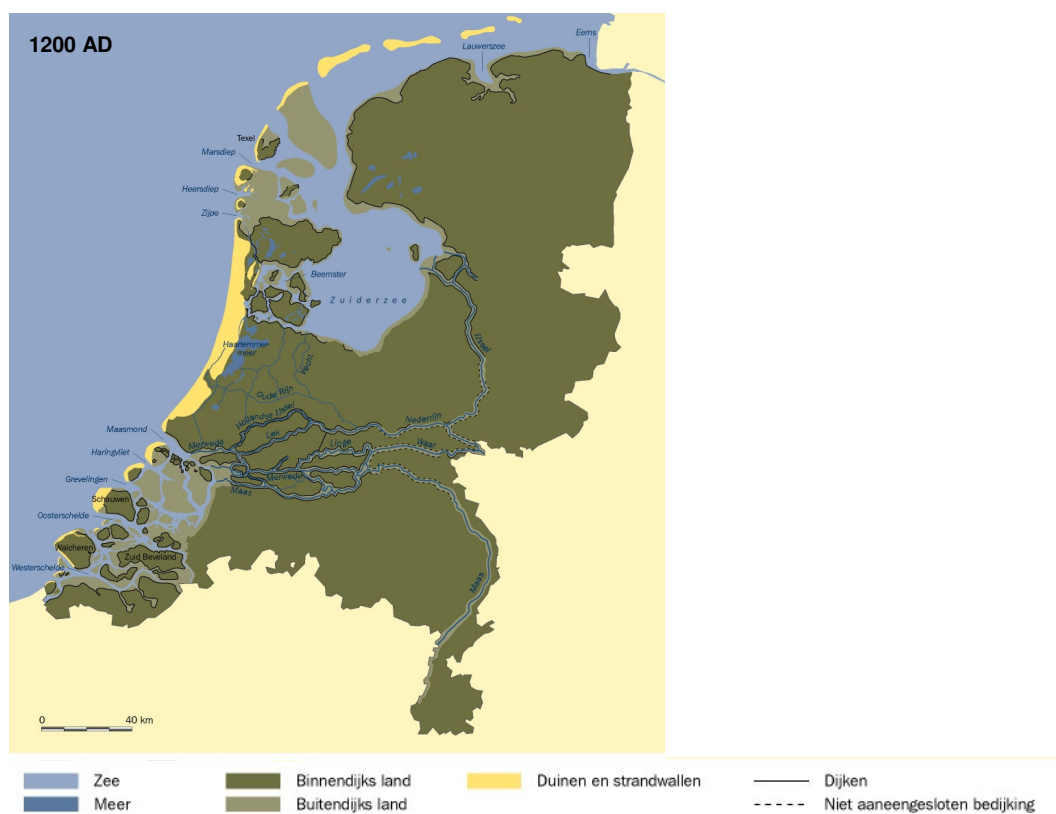
Figuur 9: Reconstructie van het Pleistocene oppervlak aan het begin van het Holoceen.



Figuur 10: Paleogeohydrologische ontwikkeling van 5500 v. Chr. – 800 n. Chr. Anno ~3850 v. Chr. en ~800 na Chr. kon in het grondwatersysteem van de Provincie Flevoland gemakkelijk brak tot zout oppervlaktewater infiltreren.



Figuur 11: Holocene ontwikkeling in IJsselmeerpolders.



Figuur 12: Binnen- en buitendijks land rond 1200 AD.

3.2.2 *Het Holocene*

Na deze onderbreking van continentale omstandigheden waarin gedurende een periode van ongeveer 120.000 jaar de Formaties van Boxtel en Kreftenheye door rivieren werden gevormd, (het Weichselien en het Vroeg Holocene) krijgt de zee in de loop van het Holocene weer invloed in het gebied. Belangrijk tijdens de continentale periode is de ligging van allerlei rivier- en beeklopen. Van noord naar zuid zijn dit de Tjonger, Overijsselse Vecht, IJssel, Hierdense beek en Eem (Figuur 8). De beken liggen in dalsystemen die te ten dele te herkennen zijn in de ligging van de top van het Pleistoceen (Figuur 9). Deze waterlopen kwamen samen ten westen van de huidige polders om vervolgens uit te monden in het zeegat van Bergen. De zee drong vanuit het zeegat en het dalsysteem in het achterland binnen.

Tijdens het Holocene vonden de volgende belangrijke inbraken van de zee plaats (1) vanuit het westen gedurende het Vroege Holocene (d.w.z. tot 5000 jaar BP) en (2) vanuit het noorden en leidden tot de vorming van de Zuiderzee vanaf circa 500 na Christus.

3.2.2.1 *Vroeg Holocene (5000 bp)*

Bij het stijgen van de zeespiegel veranderde het gebied in een kustvlakte waarin het getij ver landinwaarts kon dringen (tot in de huidige polders). Het zoutgehalte van dit water varieerde met de hoogte van het debiet van de verschillende beken. Hierdoor ontstond een zone met een zoet-brak tot zout getijdegebied

Ten tijde van de inbraken van de zee tijdens het Vroeg Holocene was de deklaag nog niet of nauwelijks aanwezig. Alleen het basisveen kwam in grote gebieden voor maar waar inbraken plaats vonden, verdween het veen grotendeels door mariene erosie. Dit gegeven is van belang voor de verzilting van het gebied omdat dit betekent dat het zoute oppervlaktewater in direct contact stond met de goed doorlatende Pleistocene zanden, het huidige eerste watervoerende pakket. Vanwege het dichtheidsverschil tussen het zoute water aan de bovenkant en het zoete grondwater in het watervoerende pakket heeft het zout de neiging om naar beneden te zakken. Deze zgn. dichtheidsstroming is een relatief snel proces en is in staat om de ondergrond tot een diepte van honderden meters te verzilten binnen een tijdsspanne van enkele decennia.

De transgressies in deze periode zijn waarschijnlijk het belangrijkste geweest bij het verzilten van de watervoerende pakketten. Vanuit de getijdengeulen die het gebied doorsneden, kon zout water de ondergrond indringen. In de gebieden waar zich hoogveen vormde, kwam de zee niet en infiltreerde zoet regenwater. De infiltratie van zout grondwater gebeurde met grote snelheid maar stagneerde op significante slechtdoorlatende pakketten. De zoet-zout verdeling in het zuiden van Flevoland illustreert dit mooi. De aanwezigheid van de bekkenkleien (uit o.a. het Eemien) voorkwam dat infiltratie van zout grondwater plaatsvond waardoor alleen het eerste watervoerende pakket verziltte en de watervoerende pakketten onder de bekkenkleien zoet bleven (verzoet in periode tussen Eemien en Holocene).

De zoutvoorkomens rond Almere en Lelystad/Dronten zijn van elkaar gescheiden door een duidelijk zoetwaterlichaam dat in contact lijkt te staan met het “vasteland” (rond de Knardijk). De aanwezigheid hiervan is te verklaren door het feit dat hier nauwelijks verzilting dus infiltratie van zeewater heeft plaatsgevonden door de aanwezigheid van hoogveen waar infiltratie van zoet regenwater plaatsvond.

De zoutgehalten in de ondergrond laten over het algemeen een afname zien in zuidelijke en oostelijke richting. Deze weerspiegelt de afname van het zoutgehalte richting de randen van de getijdengebieden die bestaan zal hebben als gevolg van de aanvoer van zoet water vanuit het achterland. In het Atlanticum was de Rijn nog niet verbonden met de IJssel dus de laatste draineerde alleen Salland en de Achterhoek. Het drainagegebied van de Vecht is veel groter; in de Noordoostpolder voegde de Tjonger zich nog bij dit systeem. De Hierdense beek en de Eem zijn ook kleine systemen. Op grond van deze overwegingen valt te verwachten dat het water uit het Vecht estuarium het laagste zoutgehalte had en dat de zouttong het diepst landinwaarts drong in de Flevopolders.

In de Noordoostpolder was tijdens het Vroeg-Holocene geen sprake van getijdengebieden. Regionaal onderzoek in de Noordoostpolder laat zien dat in het gebied gedurende het grootste deel van het Holocene (hoogveen werd gevormd). Natuurlijke meren (meerstallen) waren verbonden met de erdoorheen stromende riviertjes. Op verschillende diepteniveaus worden kleilagen gevonden in het veenpakket. De klei is voornamelijk afkomstig uit het zeegat. De veenlaag wordt drie maal onderbroken en de diepste kleilaag (bovenkant op -5.50 m onder NAP) is het dikst ontwikkeld. De jongere fasen zijn gemarkeerd door dunne kleidekjes. Gotjé, (1993) laat zien dat deze de vegetatie langs de banen met kleisedimentatie van oud naar jong steeds “zout” toleranter wordt en als brak moet worden geduid. Galigaanvelden (zoet tot zwak brak tolerant) begeleiden de oudste fase, de jongste fase, die bekend staat onder de naam “Cardium fase” (Figuur 11) vanwege de grote hoeveelheid *Cerastoderma* c.f. *Cardium Glaucum*, vindt plaats in riet (brak tolerant) omzoomde wateren. Na de kleisedimentatie fase die wordt teruggevonden rond 2.50 m –NAP breekt weer een fase met uitgebreide veenontwikkeling aan (Figuur 10d). Deze fase degenereert tot het zoete Almere.

3.2.2.2 *Zuiderzeefase*

Vanaf 500 na Chr. vinden hernieuwde inbraken plaats en transformeerde het Almere in een lagune met een toenemende zoutbelasting vanuit het noorden (Zuiderzeefase, Figuur 10f). In deze periode maakt de Rijn contact met de IJssel waardoor het debiet van deze rivier sterk toeneemt. Dit veroorzaakt een sterk gradiënt in het zoutgehalte van het lagunewater, de westkant is veel zouter dan de oost- en zuidkant.

Tussen Staveren en Enkhuizen ontwikkelden zich vrij diepe getijdegeulen (cf. de val van Urk) met ten zuiden daarvan belangrijke zandbanken (cf. het Enkhuizer zand). Op grond hiervan kan worden verwacht dat de circulatie, vanuit de Waddenzee, in het noordelijk deel van de Zuiderzee veel beter zal zijn geweest dan in het zuidoostelijk deel. Dit impliceert ook een zuid-noord zoutgradiënt.

Korrelgrootteanalyse van de Zuiderzeebodem afzettingen weerspiegelen ook grote verschillen in waterdynamiek (Pons en Wiggers, 1959). Gebieden met relatief veel lutum wisselen af met lutumarme gebieden. Langs de voormalige oostkust komen ook kustwallen voor bijv. langs de gehele landzijde van de Noordoostpolder (Bodemkaart 1:200.000). Op grond hiervan kan worden verwacht dat de c-waarde van de Zuiderzeebodem-afzettingen variabel zal zijn.

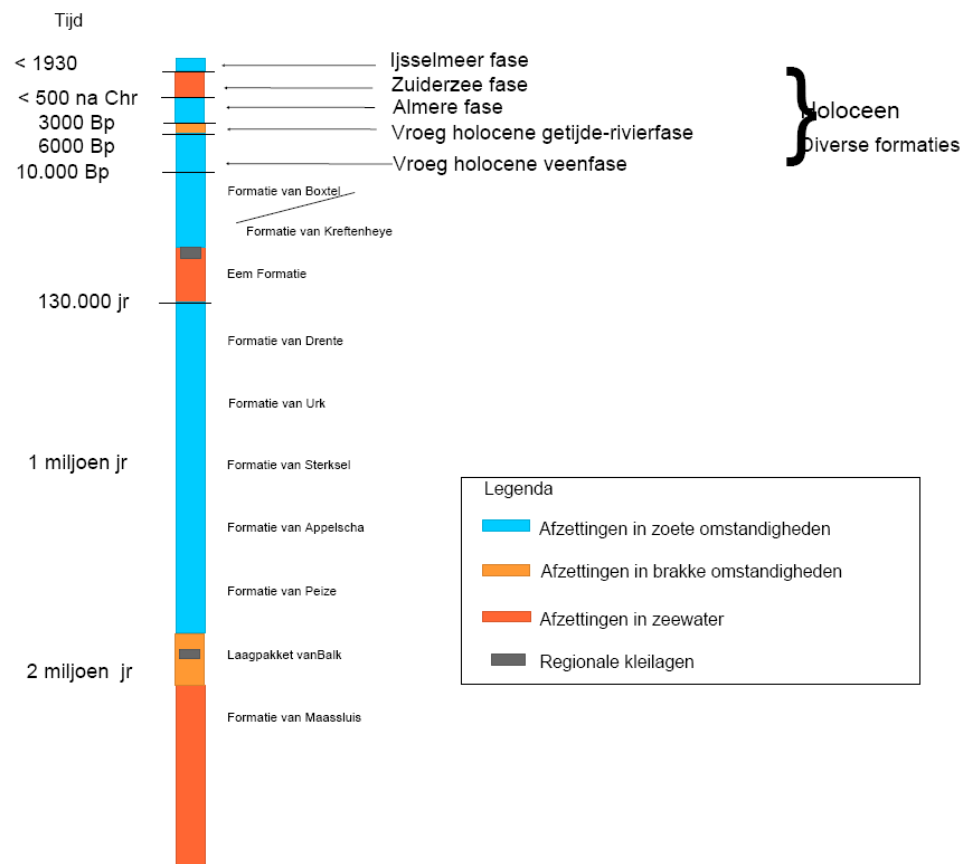
In de Noordoostpolder was van mariene invloed pas sprake ten tijde van de aanwezigheid van de Zuiderzee. Hoewel de vorming van de Zuiderzee al vanaf 1200 na Christus plaatsvond, was er vanaf 1600 na Christus pas sprake van een toename van het zoutgehalte. Verzilting van de ondergrond van een deel van de Noordoostpolder heeft dus slechts gedurende een relatief korte tijdsperiode van enkele eeuwen kunnen plaatsvinden. Daarnaast was in deze periode de deklaag al behoorlijk ontwikkeld en

bemoeilijkt deze laag infiltratie van brak tot zout water. Bovendien waren door mening van zoet rivierwater de zoutgehalten van het water in dit deel van de Zuiderzee relatief laag door de nabijheid van de monding van de IJssel. Deze drie factoren verklaren waarom in de ondergrond wel zout grondwater aanwezig is maar ook waarom de zoutgehalten lager zijn dan de voorkomens in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland bij Almere en Lelystad/Dronten.

Het voorkomen van brak/zout grondwater op grotere diepte in de Noordoostpolder kan niet alleen door diffusie verklaard worden. Hoewel niet met zekerheid gezegd kan worden welke mechanismen hier werkzaam zijn geweest, moet verondersteld worden dat dichtheidstroming, verticaal dan wel lateraal, ook een rol gespeeld moet hebben. Tenslotte valt niet geheel uit te sluiten dat restanten zout grondwater uit het Eem stammen.

Ook in de overige delen van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland heeft verzilting vanuit de Zuiderzee plaatsgevonden. De snelheid waarmee verzilting optrad was echter veel lager dan tijdens het Vroeg Holocene vanwege de aanwezigheid van de Holocene deklaag en de kortere periode waar in dit plaatsvond. De lage doorlatendheid hiervan zorgde er voor dat dichtheidsstroming nauwelijks op trad. In plaats daarvan drong opgelost zout de ondergrond in door diffusie. Dit is een langzaam proces en is duidelijk herkenbaar in de zoutverdeling in de Holocene deklaag die gekenmerkt wordt door een langzame afname van het zoutgehalte met de diepte vanaf een zekere diepte. Boven deze diepte is een afname richting het maaiveld waar te nemen die het gevolg is van verzoeting sinds het ontstaan van het IJsselmeer en ontwatering na inpoldering.

Laterale verplaatsing van het zout of zoet grondwater spelen een beperkte rol bij de zoet-zout verdeling in de ondergrond. Modelsimulaties tonen aan dat een laterale stroming met een snelheid van enkele meters per jaar mogelijk is puur als gevolg van dichtheidsverschillen tussen zout en zoet grondwater (Post, 2004).



Figuur 13: Opeenvolging.

3.3 Conclusies

Het zoutgehalte van het grondwater van de polders varieert sterk. Gezien de lange perioden waarin de bodem met zoetwater kon worden doorgespoeld tijdens het Pleistoceen, zijn de huidige patronen in de zoet-zout verdeling waarschijnlijk niet toe te schrijven aan de transgressies gedurende het Pleistoceen. De Eemzee heeft ongetwijfeld in een periode van ongeveer 6000 jaar (130.000 jaar geleden) de gehele ondergrond verzilt. Echter, de daarop volgende continentale periode die ruim 100.000 jaar duurde en waarin vlechtende rivieren het gebied doorstroomden, was lang genoeg om de pakketten weer te verzoeten. Hoe dieper hoe moeilijker deze verzoeting ging en het is daarom mogelijk dat in de slechter doorlatende pakketten op ongeveer 200 meter diepte zout Eem-water is terug te vinden.

Het zoute grondwater in de bovenste 200 meter van de Provincie Flevoland is zeer waarschijnlijk volledig toe te schrijven aan de transgressies gedurende het Holoceen. De belangrijkste transgressie was die in het vroeg-Holoceen ongeveer 5000 jaar geleden. De deklaag was nauwelijks gevormd, infiltratie van zout water kon gemakkelijk plaatsvinden en werd nog eens versneld door het proces dat dichtheidstroming wordt genoemd, waarbij zout water met een hogere dichtheid relatief snel het zoete grondwatersysteem kan binnendringen. De verzilting was het grootst ter plaatse van de getijdegeulen waar weerstandsbiedende slechtdoorlatende lagen grotendeels afwezig waren. Daarnaast was verzilting afwezig op hoger gelegen delen die bedekt waren met hoogveen. Het zoute water dat infiltreerde varieerde met locatie

en tijd in zoutgehalte door verdunning als gevolg van de aanwezigheid van de monding van verschillende beken en/of rivieren.

Door de aanwezigheid van de bekkenklei in het zuidoosten kon het zoute water hier niet verder infiltreren en wordt er zoetwater onder deze bekkenklei aangetroffen terwijl boven de bekkenklei zout grondwater ligt.

De Zuiderzeefase heeft een beperkte verzilting tot gevolg gehad vanwege de aanwezigheid van de Holocene deklaag en de relatief korter periode. De lage doorlatendheid hiervan zorgde er voor dat dichtheidsstroming nauwelijks op trad. In plaats daarvan drong opgelost zout de ondergrond in door diffusie.

Verzoeting sinds het ontstaan van het IJsselmeer speelt nauwelijks een rol door de zeer geringe infiltratiesnelheden door de aanwezigheid van de deklaag en afwezigheid van grote stijghoogteverschillen en de korte periode sinds afsluiting van de Zuiderzee.

Veranderingen van het zoutgehalte in de ondergrond worden voornamelijk veroorzaakt door verticale grondwaterstroming dus infiltratie, kwel en grondwateronttrekkingen en in veel mindere mate door horizontale stroming. Bijvoorbeeld de laterale verplaatsing van het zoet-zout grensvlak als gevolg van horizontale grondwaterstroming vanaf de Veluwe is slechts maximaal enkele meters per jaar ondanks de sterke hydraulische gradient vanaf de Veluwe.

4 Beschrijving grondwatersysteem

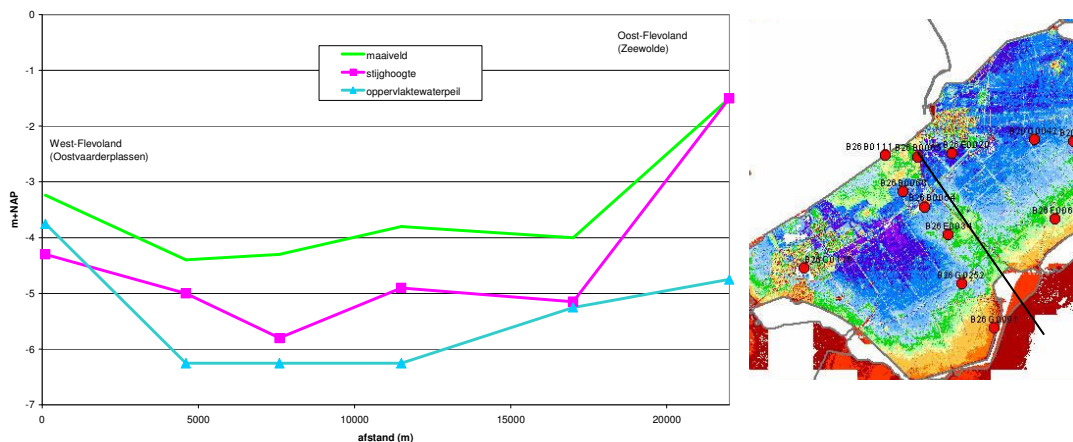
4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt kort het grondwatersysteem beschreven waarbij wordt ingegaan op de regionale grondwaterstromingen, kwel –en infiltratie en relatie grondwater-oppevlaktewater.

4.2 Algemene beschrijving watersysteem

Het geohydrologisch systeem waarin Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en de Noordoostpolder liggen, wordt in zuidoostelijke richting begrensd door de waterscheiding op de stuwwallen van de Veluwe en Utrechtse Heuvelrug, vanwaar het regionale hydrologische systeem gevoed wordt. Aan de west- en noordzijde kunnen de dijken van het huidige IJsselmeer en Markermeer als scheiding worden aangeduid, al is deze begrenzing minder duidelijk (Artesia/DHV, 2004).

De mens heeft relatief recent een aantal grote ingrepen uitgevoerd in het hydrologische systeem, namelijk de afsluiting van de Zuiderzee (1932), de inpoldering van Noordoostpolder (1940), Oostelijk Flevoland (1957) en Zuidelijk Flevoland (1968) en het winnen van grondwater.

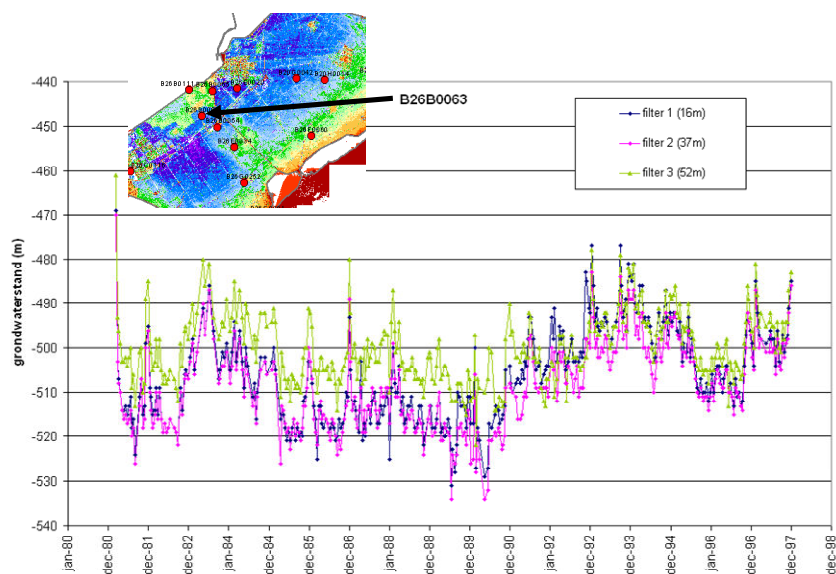


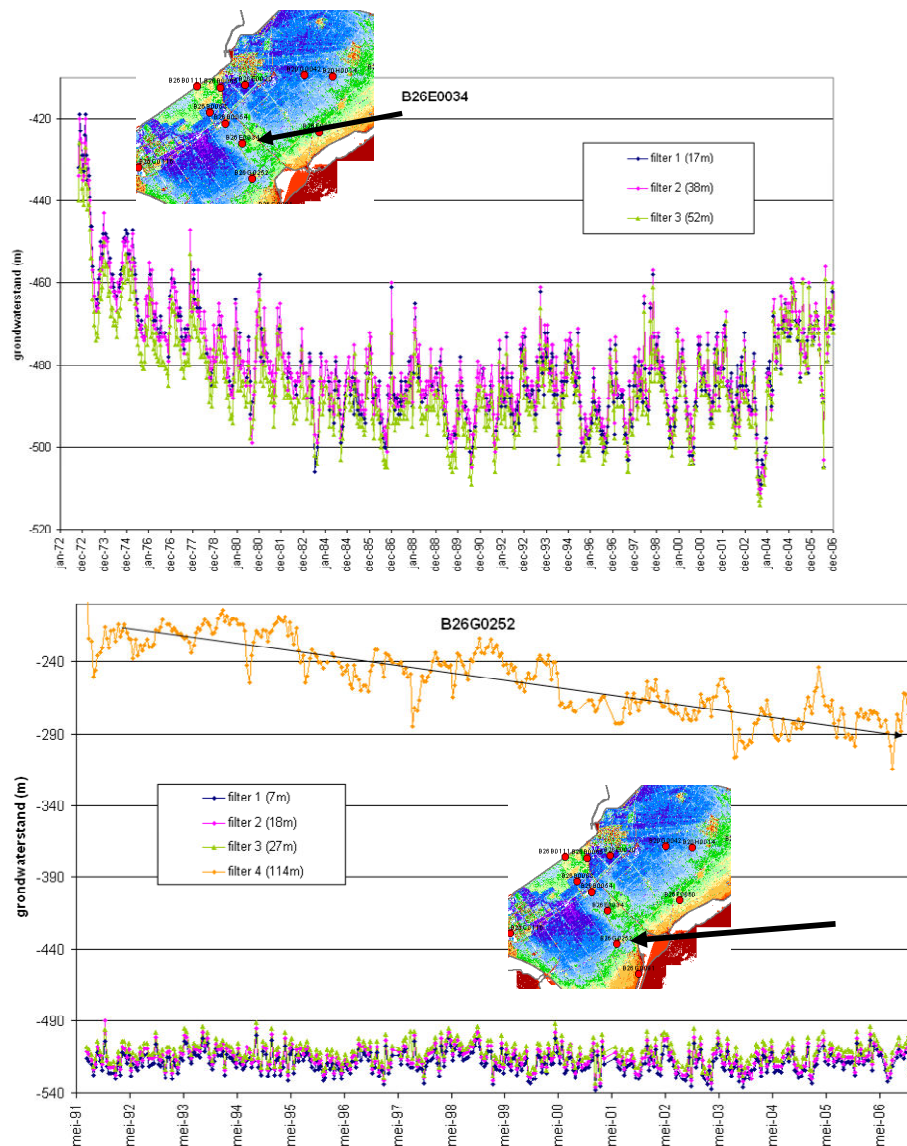
Figuur 14: Het verloop van het maaiveld, de grondwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in een noordwest-oostzuid profiel door het zuiden van Flevoland op basis van stijghoogtemetingen.

De afsluiting van de Zuiderzee heeft ertoe geleid dat er geleidelijk een overgang van zoute naar brakke tot zoete condities aan het plaatsvinden is. Door de inpoldering en bemaling van de polders is het oppervlaktewaterpeil en freatische grondwaterstand minstens 5 meter gedaald waardoor er een sterke grondwaterstroming richting de polders is ontstaan. Hierdoor is de grondwaterstroming vanaf de Veluwe en Utrechtse heuvelrug toegenomen (zie Figuur 14). Regionaal gezien treedt grondwater in de polders uit en kan het als een kwelgebied worden gezien. Grondwaterstroming richting de polder als gevolg van de sterke peilverlaging in de polders heeft ook een daling van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket veroorzaakt. Ten westen van het centrum van de polder is de stijghoogte hierdoor het laagst en neemt naar de randen van de polder toe. Stijghoogtemetingen illustreren dit (zie Figuur 14). De

stijghoogtegradiënt richting het oosten is het sterkst als gevolg van de invloed van de Veluwe. Naar het westen neemt de invloed van het IJsselmeer toe. In Figuur 14 is ook te zien dat de stijghoogte bijna altijd hoger ligt dan het oppervlaktewaterpeil dat dus stroming vanuit het eerste watervoerende pakket naar het oppervlaktewatersysteem impliceert.

Stijghoogtemetingen illustreren ook mooi de invloed van de bekkenklei op de geohydrologie (zie Figuur 15). Meetpunt B26B0063 (Figuur 15a) ligt buiten de bekkenklei en buiten de invloed van grondwateronttrekkingen. De weerstand tussen het eerste en het tweede watervoerende pakket is gering waardoor er slechts een geringe stijghoogteverschil wordt gemeten van hooguit 15 cm. De stijghoogtemetingen geven wel aan dat er grondwater vanuit het tweede naar het eerste watervoerende pakket stroomt. Meetpunt B26E0034 (Figuur 15b) ligt ook net buiten de zone van de bekkenklei maar laat een duidelijke dalende trend zien van de stijghoogte sinds het begin van de meting (1972). Deze wordt mogelijk veroorzaakt door een combinatie van de drooglegging van Zuidelijk Flevoland in 1968 en de grote grondwaterwinningen. Vanaf ongeveer 1982 is de dalende trend gestopt. Echter, de stijghoogte onder de bekkenklei van meetpunt B26G0252 (filter 4, Figuur 15c) laat hedendaags nog steeds een dalende trend zien. Zoet grondwater wordt onder de bekkenklei onttrokken en aanvulling vanuit de bovenliggende pakketten door de bekkenklei is nauwelijks mogelijk waardoor de stijghoogte steeds verder wordt verlaagd en de verlagingskegel steeds verder uitbreidt. Mogelijk speelt ook hier de inpoldering van Zuidelijk Flevoland nog een rol maar dit wordt minder aannemelijk geacht. Het grote stijghoogteverschil van 2-2.5m tussen de filters boven en onder de bekkenklei illustreert goed de grote weerstand van deze scheidende laag.





Figuur 15: Stijghoogtemetingen van drie verschillende meetpunten: a) B26B0063, b) B26E0034 en c) B26G0252.

Sinds de inpoldering vindt er infiltratie plaats vanuit het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren, waarna het water opkwelt in de polders. De reistijden van het water dat direct achter de dijk opkwelt is kort (enkele tientallen jaren). Echter, de reistijd van kwelwater neemt zeer sterk toe met afstand van het open water. Uit modelberekeningen blijkt dat na enkele honderden meters het grondwater al een reistijd van meer dan 50 jaar heeft waardoor dit kwelwater een meer regionale herkomst kent en niet in het randmeer of IJsselmeer is geïnfiltrerd. Aan de oostrand van de Flevopolder is dit achter dijk waar te nemen aan de vegetatie. Met afstand tot het randmeer verandert de vegetatie in een type dat meer afhankelijk is van regionaal grondwater. In Oostelijk Flevoland, is het effect van inpoldering dat het grensvlak van het nieuwe IJsselmeersysteem en het Veluwesysteem meer in de richting van het centrum van de polder opschuift (Artesia/DHV, 2004). Op basis hiervan kan grofweg een onderverdeling worden gemaakt tussen het westelijk en zuidelijk deel van Flevoland dat

voornamelijk onder invloed van het IJsselmeer is komen te staan en het oostelijk deel dat wordt beïnvloed door het Veluwe systeem.

4.3 Hydrologische deelsystemen

Zoals in de vorige paragraaf is beschreven wordt het regionale grondwatersysteem van Flevoland en de Noordoostpolder beïnvloed door de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug. Naast dit grootschalige hydrologische systeem zijn op kleinere schaal ook ondiepere deelsystemen te onderscheiden. Voor de Flevopolders zijn de volgende deelsystemen van belang (Haskoning, 2003):

- Flevopoldersysteem;
- IJsselmeersysteem;
- Gooimeersysteem;
- Oostelijk Randmeersysteem;
- 't Gooisysteem;
- Oude Landsysteem.

Voor de Noordoostpolder zijn de volgende deelsystemen te onderscheiden:

- Noordoostpoldersysteem;
- IJsselmeersysteem;
- Ketelmeersysteem;
- Zwartemeersysteem;
- Oude Landsysteem.

Het IJsselmeersysteem en het Oude Landsysteem komen zowel in Flevoland als de Noordoostpolder voor. In de studie van Haskoning (2003) is met behulp van het grondwatermodel in TRIWACO voor elk watervoerend pakket berekend door welke deelsystemen deze gevoed wordt en tot waar het deelsysteem in het pakket reikt. Op deze manier is de herkomst van elk waterdeeltje in de ondergrond bepaald en is inzicht verkregen in de werking van het hydrologisch systeem. Hieronder volgt een algemene beschrijving van de werking van het hydrologisch systeem voor Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en voor de Noordoostpolder gebaseerd op de studie van Haskoning (2003).

Het is echter belangrijk te beseffen dat grondwatersystemen vaak worden gekenmerkt door een kwelgebied en het bijbehorende infiltratiegebied. Deze relatie gaat voor Zuidelijk en Oostelijk Flevoland niet helemaal op. Dit komt omdat het huidige grondwatersysteem pas is ontstaan na inpoldering, ongeveer 30 tot 60 jaar geleden. Water dat nu in de polder opkwelt is dus niet afkomstig van het infiltratiegebied dat in de huidige situatie bij het kwelgebied hoort. We hebben in het vorige hoofdstuk ook al gezien dat er Holocene transgressiewater van ongeveer 5000 jaar oud in de watervoerende pakketten zit dat zich nu langzaam een weg naar boven vindt. Dus wanneer reistijden langer zijn dan 30 tot 40 jaar dan is het kwelwater niet afkomstig uit het bijbehorende infiltratiegebied.

Zuidelijk Flevoland

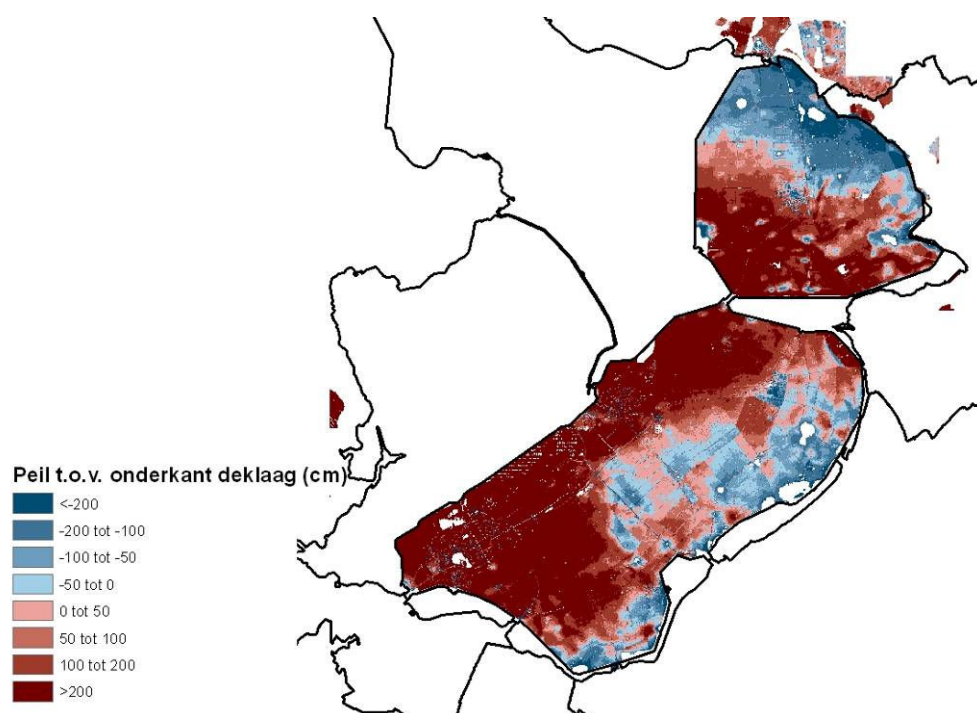
Als gevolg van de aanwezigheid van de Eem-Woudenbergklei (eerste scheidende laag) reikt het Flevopoldersysteem, dat zich in het centrale deel bevindt, niet dieper dan het eerste watervoerend pakket. Dit zorgt ervoor dat de neerslag die op de polder valt infiltreert, door het eerste watervoerend pakket stroomt en vervolgens weer opkwelt in de watergangen. Het westelijk deel van Flevoland wordt gevoed door het IJsselmeersysteem en in het zuidelijk deel bevindt zich 't Gooi- en Gooimeersysteem.

Dieper in de ondergrond (onder de eerste scheidende laag) wordt het zuiden van Flevoland voornamelijk gevoed door het IJsselmeersysteem (westen), 't Gooisysteem (zuiden) en het Oudelandsysteem (oosten) (Haskoning, 2003).

Oostelijk Flevoland

In vergelijking tot Zuidelijk Flevoland reikt het Flevopoldersysteem in het Oostelijk Flevoland veel dieper; tot in het derde watervoerend pakket. Dit wordt veroorzaakt door de insnijding van de watergangen door de deklaag (Figuur 16) en de dunne eerste en tweede scheidende laag (Formatie van Beegden en Eem-Woudenberg (SDL1), en Drente (SDL2a).

Door het lage waterpeil van de watergangen is de stijghoogte in de diepere watervoerende pakketten ook lager. Het aanwezige potentiaalverschil leidt ertoe dat het infiltrerende neerslagwater tot diep in de ondergrond stroomt.



Figuur 16: Oppervlakte waterpeil ten opzichte van onderkant van deklaag.

Noordoostpolder

De situatie in de Noordoostpolder is vergelijkbaar met de rest van Flevoland; daar waar de watergangen de deklaag doorsnijden (noordoostelijke helft) reikt het Noordoostpolder systeem diep tot in het derde watervoerend pakket. Bij geen doorsnijding (zuidwestelijk deel) reikt dit systeem slechts tot in het eerste watervoerend pakket (Haskoning, 2003).

4.4 Infiltratie- en kwelgebieden

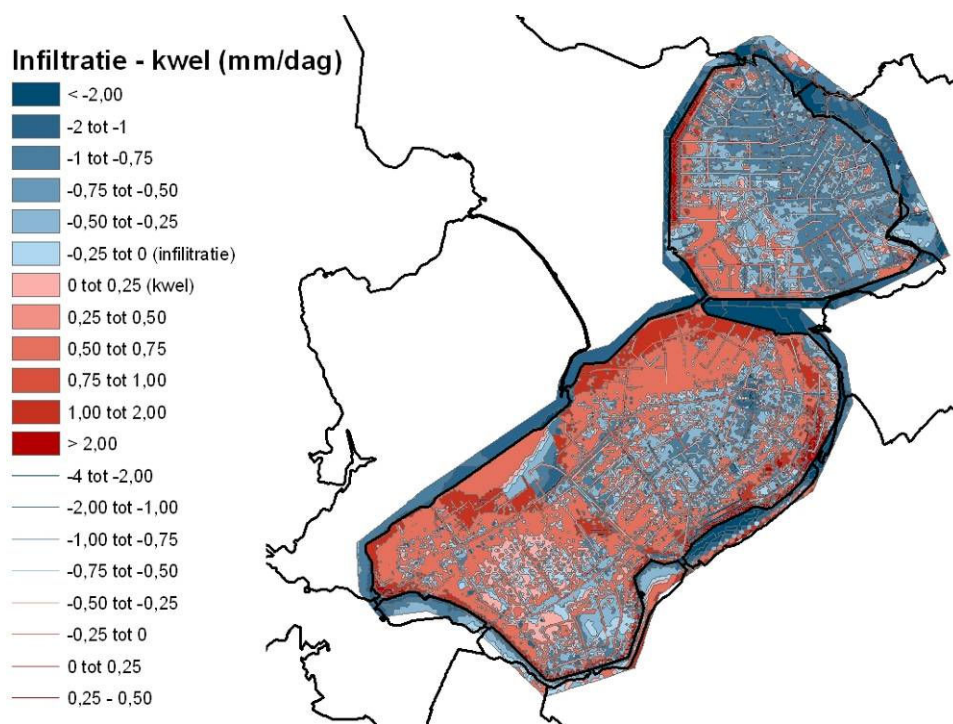
Kwel en infiltratie zijn niet alleen van belang voor het grondwaterregime maar ook bepalend voor de zoet-zout verdeling in de watervoerende pakketten. Daarom is het van belang om inzicht te verkrijgen in de verdeling van kwel- en infiltratiegebieden in Flevoland en de Noordoostpolder. Uit Figuur 17 blijkt dat bij de randen van de IJsselmeerpolders een sterke kwelflux gegenereerd wordt terwijl in het centrale deel van Flevoland en overgrote deel van de Noordoostpolder infiltratie dominant is. Verder valt

op dat in alle grote vaarten kwel optreedt; ook in de infiltratiegebieden. Dit kan verklaard worden doordat op sommige plaatsen de watergangen de deklaag doorsnijden waardoor de weerstand tussen het watervoerend pakket en de watergang sterk verminderd wordt. Op die manier kan de vaart of tocht gemakkelijker van onderaf gevoed worden door kwel. Door deze kwelstroom wordt tussen de vaarten de stijghoogte verlaagd waardoor er infiltratie optreedt. Dit principe wordt schematisch weergegeven in Figuur 18.

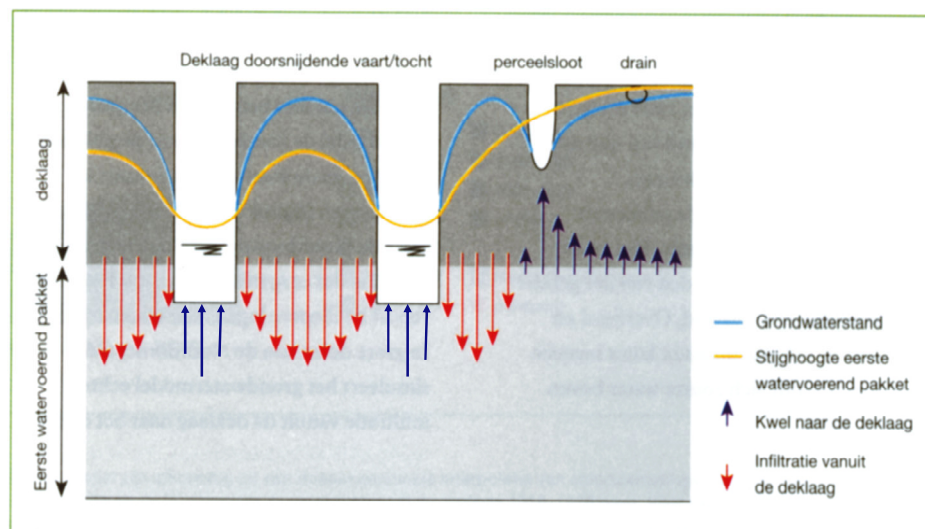
4.5 Conclusies

Belangrijke invloeden van menselijk ingrijpen op het grondwatersysteem van de Provincie Flevolands zijn inpoldering (bodemdaling) en grondwateronttrekkingen. Kwel en infiltratie zijn niet alleen van belang voor het grondwaterregime maar ook bepalend voor de zoet-zout verdeling in de watervoerende pakketten. Sinds de inpoldering wordt bij de randen van de IJsselmeerpolders een sterke kwelflux gegeneerd, terwijl in het centrale deel van Flevoland en overgrote deel van de Noordoostpolder infiltratie dominant is. De infiltratie vindt voornamelijk plaats als vaarten insnijden en scheidende lagen op diepte ontbreken (Oostelijk Flevoland, Noordoostpolder, maar niet Zuidelijk Flevoland). Verder valt op dat in alle grote vaarten kwel optreedt; dus ook in de infiltratiegebieden. Daar waar de watergangen de deklaag doorsnijden kan infiltrerend neerslag/oppervlaktewater tot diep in de ondergrond stromen. Pas op een tijdsperiode van minstens enkele tientallen jaren zal echter de aanvulling van zoet grondwater substantieel kunnen zijn.

De grondwatersysteembenadering is minder geschikt in Flevoland door de korte geschiedenis van het huidige stromingsstelsel (na inpoldering). Dit maakt een historische benadering noodzakelijk.



Figuur 17: Kwel- en infiltratiefluxen in Flevoland en de Noordoostpolder (Royal Haskoning).



Figuur 18: Lokaal grondwatersysteem met kwel in de watergangen en infiltratie tussen de watergangen.

5 Ruimtelijke spreiding in chloride concentratie

5.1 Inleiding

Beheer en gebruik van het grondwater is gebaat bij kennis over temporele dynamiek van zoet, brak en zout grondwater om onderscheidt te kunnen maken tussen stabiele en instabiele situaties en uitspraken te kunnen doen over de kwetsbaarheid van de huidige situatie. De chloride concentratie wordt als dominante representant genomen voor het zoutgehalte van het grondwater, vooral omdat deze conservatieve stof relatief veel bemeten is t.o.v. andere stoffen in de ondergrond. De chloride concentratie van het grondwater bepaalt dus de klasse indeling in zoet, brak en zout. In dit hoofdstuk wordt daarom een beeld geschetst van de 3D verdeling van chloride concentraties in het grondwater en vooral de ligging van verscheidene grensvlakken tussen zoet, brak en zoute grondwater. Ook zal nader worden ingegaan op de patronen van chloride concentraties in het oppervlaktewater in relatie tot de verdeling die is waargenomen in grondwater.

Nu is het zo dat er verschillende klasse indelingen mogelijk zijn. Afhankelijk van o.a. het gebruiksdoel zijn meerdere kwalificaties van zoet, brak en zout grondwater mogelijk. Zo heeft de term zoet grondwater voor een bloembollenkweker een andere betekenis dan voor een agrariër die suikerbieten verbouwd. Gangbaar voor de drinkwatervoorziening is de klasse indeling van Stuyfzand (Tabel 1). In de Provincie Zeeland, waar van nature het grondwater brak tot zout is, komt nauwelijks chloride concentraties kleiner dan 150 mg Cl⁻/l voor, dus heeft de Stuyfzand indeling weinig zin. Daarom is aldaar landbouwkundig zoet geïntroduceerd, zijnde 1000 mg Cl⁻/l als de grens tussen zoet en brak grondwater (deze grens wordt overigens ook in het buitenland veel gebruikt).

Tabel 1: Klasse indeling volgens Stuyfzand (1993).

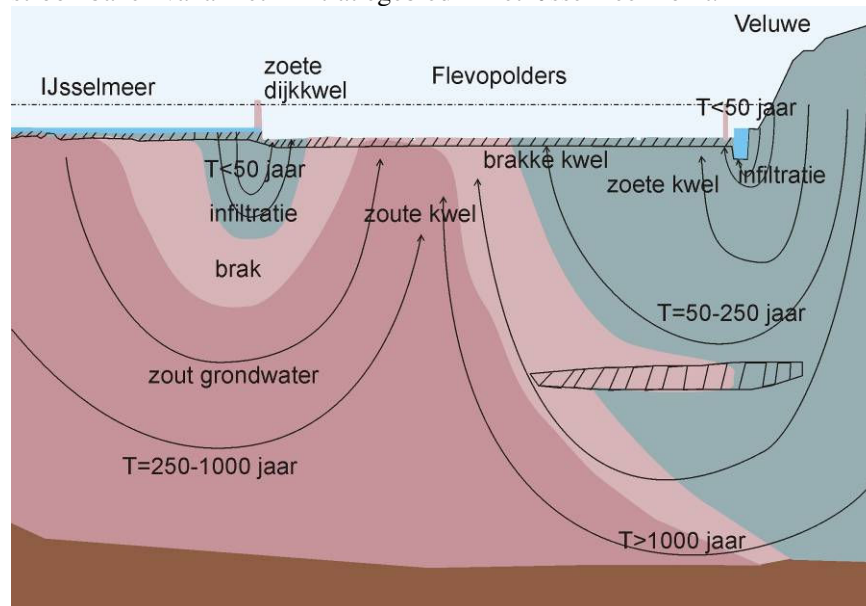
Klasse	Cl-concentratie (mg/l)
Zeet zoet	< 30
Zoet	30 - 150
Licht brak	150 - 300
Brak	300 - 1.000
Zout	1.000 - 5.000
Zeet zout	> 5.000

De grensvlakken waar we onze aandacht op richten zijn: 150 mg Cl⁻/l, 500 mg Cl⁻/l, 1000 mg Cl⁻/l, 1500 mg Cl⁻/l, 2000 mg Cl⁻/l en 2500 mg/l, waarbij voornamelijk het grensvlak van 1000 mg Cl⁻/l centraal staat.

Concept zoet-zout verdeling grondwater in Flevoland

Figuur 19 toont een schematische weergave van de regionale zoet-zout verdeling in Flevoland. Hieruit blijkt dat in het zuidoostelijk deel van Flevoland, dat voornamelijk gevoed wordt door het Veluwesysteem, zoete kwel optreedt (zowel uit ondiepe als diepe stroombanen). In het westelijk deel, dat onder invloed staat van het IJsselmeer, is het water dat langs diepe stroombanen opkwelt momenteel nog zout, maar zal uiteindelijk hetzelfde zoutgehalte verkrijgen als het water in het IJsselmeer. De

westelijke rand van Flevoland wordt gevoed door zoete dijkkwel dat via ondiepe stroombanen vanaf het infiltratiegebied in het IJsselmeer komt.



Figuur 19: Principe zoet-zout verdeling grondwater in Flevoland

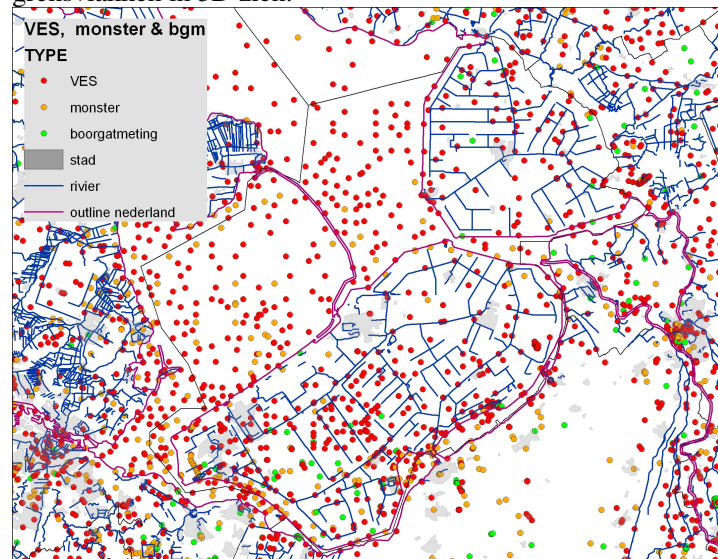
5.2 3D verdeling van zoet, brak en zout grondwater

Voor de bepaling van de 3D verdeling van zoet, brak en zout grondwater in de Provincie Flevoland is gebruik gemaakt van de uitgebreide databestanden die bij TNO in beheer zijn (DINO Qua; zoet-zout REGIS; Kloosterman, 2007, concept; Oude Essink *et al.*, 2005). De drie typen data zijn (chloride analyses, VES-metingen en boorgatmetingen), zie bijvoorbeeld Figuur 20:

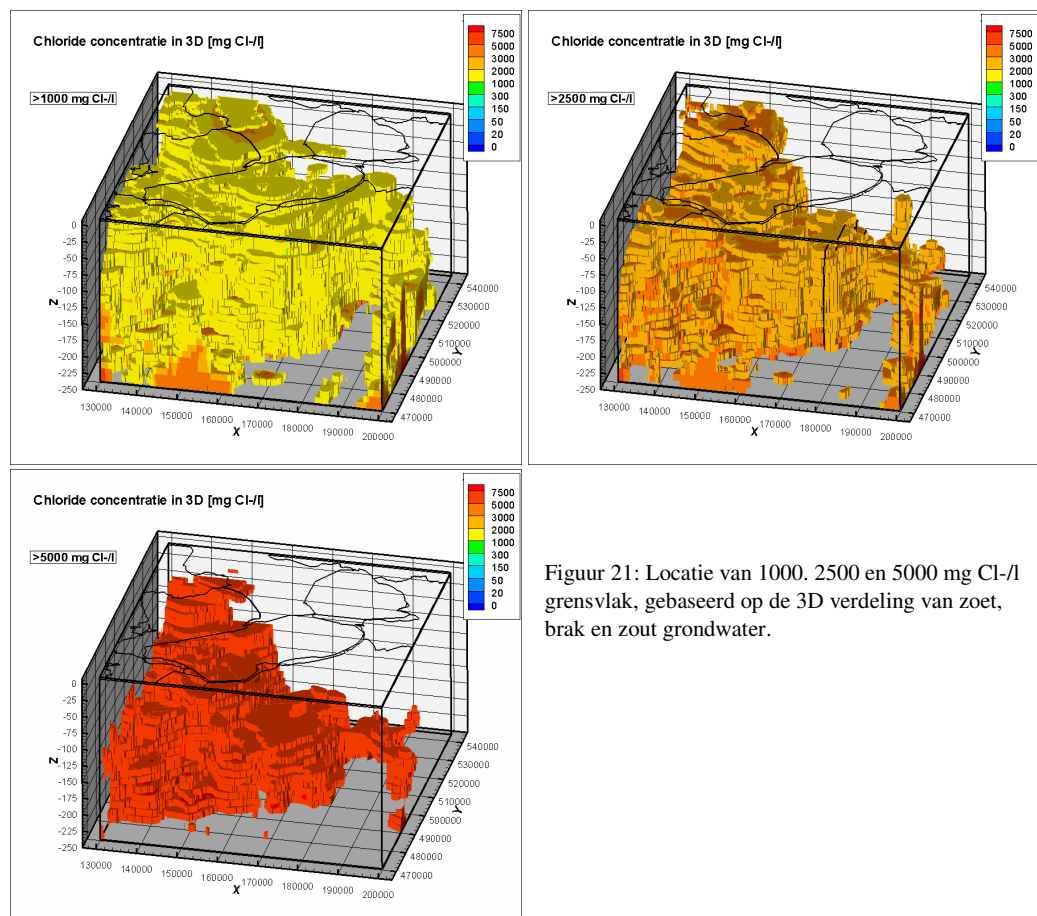
1. **Chloride analyses.** Ruim 60.000 in aantal in geheel Nederland, gemeten vanaf 1853. Slechts ongeveer 10% van de metingen ligt dieper dan -70m NAP, terwijl ongeveer 30% van de metingen brak of zout grondwater betreft (juist deze waarden zijn waardevol voor de bepaling van de zoet, brak en zout verdeling). Voor het studiegebied (de Provincie Flevoland) zijn er 25.214 analyses gebruikt;
2. **VES-metingen.** Verticale Elektrische Sonderingen zijn geo-elektrische metingen vanaf het oppervlak die informatie geven over de lithologie en het zoutgehalte van grondwater. In combinatie met de temperatuur, het bicarbonaat (HCO_3)-gehalte ter plaatse en de geologische opbouw geeft een VES-meting een indicatie van het chloride-gehalte. Voor de Provincie Flevoland zijn 42.139 metingen gebruikt.
3. **Boorgatmetingen.** Bij een boorgatmeting laat men een geofysisch apparaat (sonde) in een boorgat zakken en wordt de natuurlijke gamma straling en geo-elektrische weerstand gemeten. Op basis hiervan kan een schatting worden gemaakt van de hydrogeologische opbouw. Het chloride-gehalte is geschat op basis van een empirisch bepaalde relatie tussen het bicarbonaat-gehalte (HCO_3) en de elektrische geleidbaarheid (EC 20°C) inclusief temperatuurcorrectie van de elektrische weerstand van het grondwater (TNO, 1992). Voor de Provincie Flevoland zijn 46.282 metingen gebruikt.

Aan de hand van deze puntenwolk, alsmede geïnterpoleerde waarden volgens Kloosterman (concept, 2007), is een continue 3D veld van chloride concentratie gehalten gecreëerd. Alleen het systeem van +5m tot -250m NAP is bekeken, met

coördinaten: $x_0=130000$ (westen), $L_x=70\text{km}$ en $y_0=469000$ (zuiden), $L_y=73\text{km}$, en celdikten $1*5\text{m}$, $10*2\text{m}$, $10*5\text{m}$ en $10*20\text{m}$. Figuur 21 laat de positie van een aantal grensvlakken in 3D zien.



Figuur 20: Locaties van VES-metingen, chloride concentratie analyses en boorgatmetingen in het studiegebied, die allemaal minder dan 5m zijn verwijderd van de onderkant van de deklaag (TNO, DINO Qua; Oude Essink et al., 2005).



Figuur 21: Locatie van 1000, 2500 en 5000 mg Cl-/l grensvlak, gebaseerd op de 3D verdeling van zoet, brak en zout grondwater.

5.3 Chloride concentraties in het grondwater

Voor de beschikbare observatiepunten is aan de hand van waarnemingen van chloride concentraties in het grondwater vastgesteld in hoeverre er al dan niet sprake is van verzilting of verzoeting. Er zijn hierbij twee verzoeting/verzilting analyse methoden toegepast, namelijk chemische analyse van kationuitwisselingsprocessen en chloride concentratie meetreeksen.

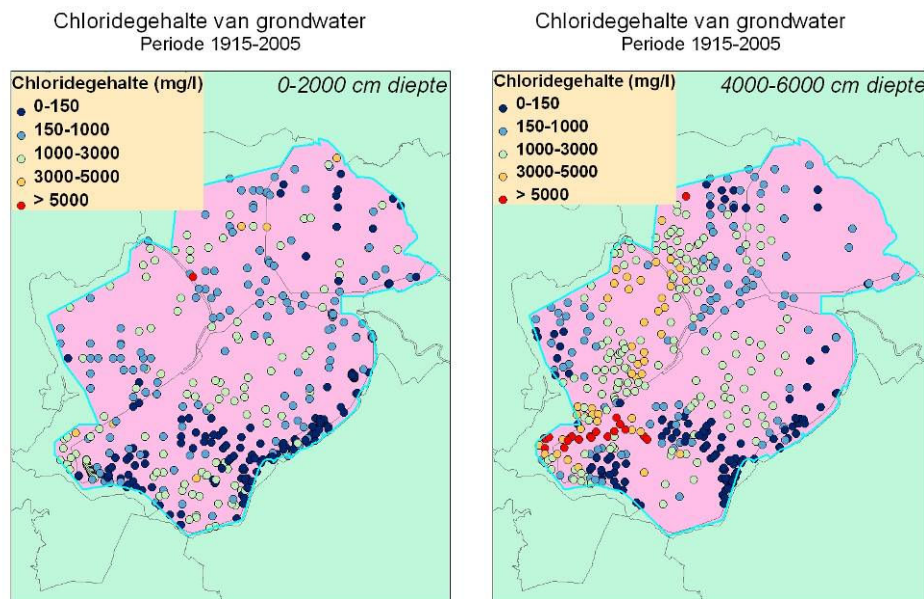
De gegevens voor de analyse van verzoeting en verzilting in grondwater zijn grotendeels afkomstig uit de DINO-database van TNO. In totaal zijn er 2809 chloridemetingen verzameld afkomstig van 835 grondwaterputten in de periode 1915-2005. Voor de kationuitwisseling zijn er minder gegevens aanwezig, doordat deze bepaling niet voor alle grondwatermonsters wordt uitgevoerd. Voor een uitgebreide beschrijving van de toegepaste methoden en resultaten wordt verwezen naar Bijlage B. Hieronder worden de belangrijkste resultaten besproken.

5.3.1 Resultaten

5.3.1.1 Chloride concentraties

De ruimtelijke variatie van de chloride concentraties in het grondwater voor de diepte klassen < 2000 cm en 4000-6000 cm is weergegeven in Figuur 22a en b. De waarden zijn gemiddelden over de periode 1915-2005. Beide figuren tonen duidelijke ruimtelijke verschillen in chloride concentratie. Het grootste deel van de waarnemingspunten is brak tot matig zout (150 – 3000 mg/l). Zoet grondwater (<150 mg/l) komt in de hele provincie op alle diepten voor maar clustert zich vooral bij de randmeren (tussen Flevoland en Gelderland en Flevoland en Noord-Holland, onder Almere) met een uitloper tussen Almere en Lelystad (van Zeewolde tot de Oostervaardersplassen) en enkele locaties in de Noordoostpolder. De Noordoostpolder heeft echter een lage dichtheid aan gegevens waardoor het moeilijk is om dit gebied goed te beschrijven. Op een diepte tot 2000 cm (Figuur 22a) komen nauwelijks zout (3000 -5000 mg/l) tot zeer zoute (>5000 mg/l) monsters voor. Het IJsselmeer is grotendeels brak tot matig zout en dit geldt ook voor het gebied rond Lelystad, Dronten en westelijk van Almere. Op een diepte van 4000 tot 6000 cm (Figuur 22b) zijn duidelijk meer zoute gebieden aanwezig. Met name het grondwater rond Almere en het westelijk deel van het IJsselmeer is op deze diepte zeer zout.

Een vergelijking van Figuur 22a en b laat duidelijk de verschillen zien in chloride concentratie tussen de twee verschillende diepteklassen. Het IJsselmeer verandert van brak tot matig zout naar matig zout tot zout vooral in de middenstrook van het meer ter hoogte van de Oostvaardersplassen en een deel van Almere. De grootste veranderingen treden op in een strook nabij Almere waarbij het grondwater verandert met de diepte van brak tot matig zout naar zout tot zeer zout.



Figuur 22: Ruimtelijke verdeling van de chloride concentratie in de periode 1915-2005 in de Provincie Flevoland onderverdeeld in chlorideklassen volgens tabel B3 op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b).

5.3.1.2 Tijdsreeksen chloride

Aan de hand van chloride concentraties wordt de verzilting en verzoeting van de desbetreffende observatiepunten bepaald. Er worden hierbij twee verzoeting/verzilting analyse methoden toegepast: chemische analyse van kationuitwisselingsprocessen en chloride concentratie meetreeksen. De verschillen van de chloride concentratie met de tijd worden volledig behandeld in Bijlage B.

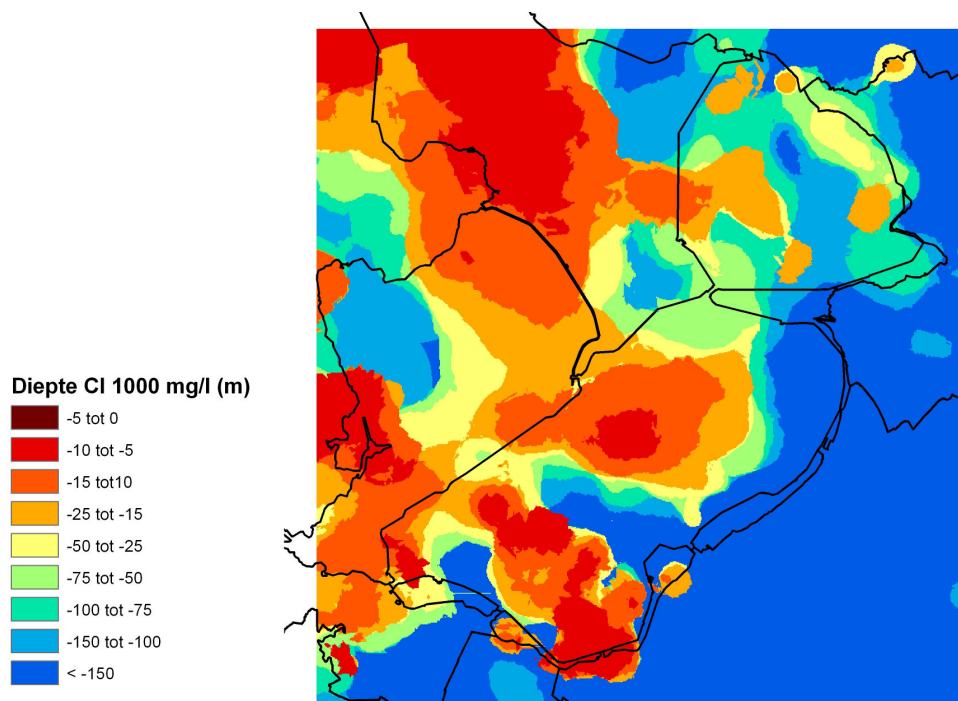
5.3.2 Conclusies

- De chloride concentratie heeft een grote variatie in ruimte en diepte, maar minder in de tijd. Zoete gebieden bevinden zich bij de randmeren en tussen Almere en Lelystad. Het IJsselmeer en het middendeel van Flevoland is grotendeels brak tot matig zout tot een diepte van ongeveer 40 m. Op een grotere diepte (40-60 m) is het grondwater van het IJsselmeer matig zout tot zout en is vooral rond Almere een groot zout tot zeer zout gebied te vinden.
- Voor de verzilting en verzoeting analyse is de tijdsspanne van de analyse van groot belang.
- Over het algemeen laten de figuren van chloride concentratie tijdreeksen zien dat er verzoeting optreedt in meerdere gebieden van Flevoland, vooral in de bovenste 20 meter in het noordwestelijk deel van de Noordoostpolder, het westelijk deel van Zuidelijk Flevoland en de toch al redelijk zoete randmeren. Verzilting treedt in sommige delen nog wel op tot in de jaren '70 (in het westelijk deel van Zuidelijk Flevoland op een diepte van -40 - -60 m N.A.P.), maar daarna vindt voornamelijk verzoeting plaats. Punten met sterke verzilting zijn hoofdzakelijk waargenomen in het noordelijke en zuidelijke deel van het IJsselmeergebied.

5.4 Ruimtelijke verdeling van chloride grensvlakken

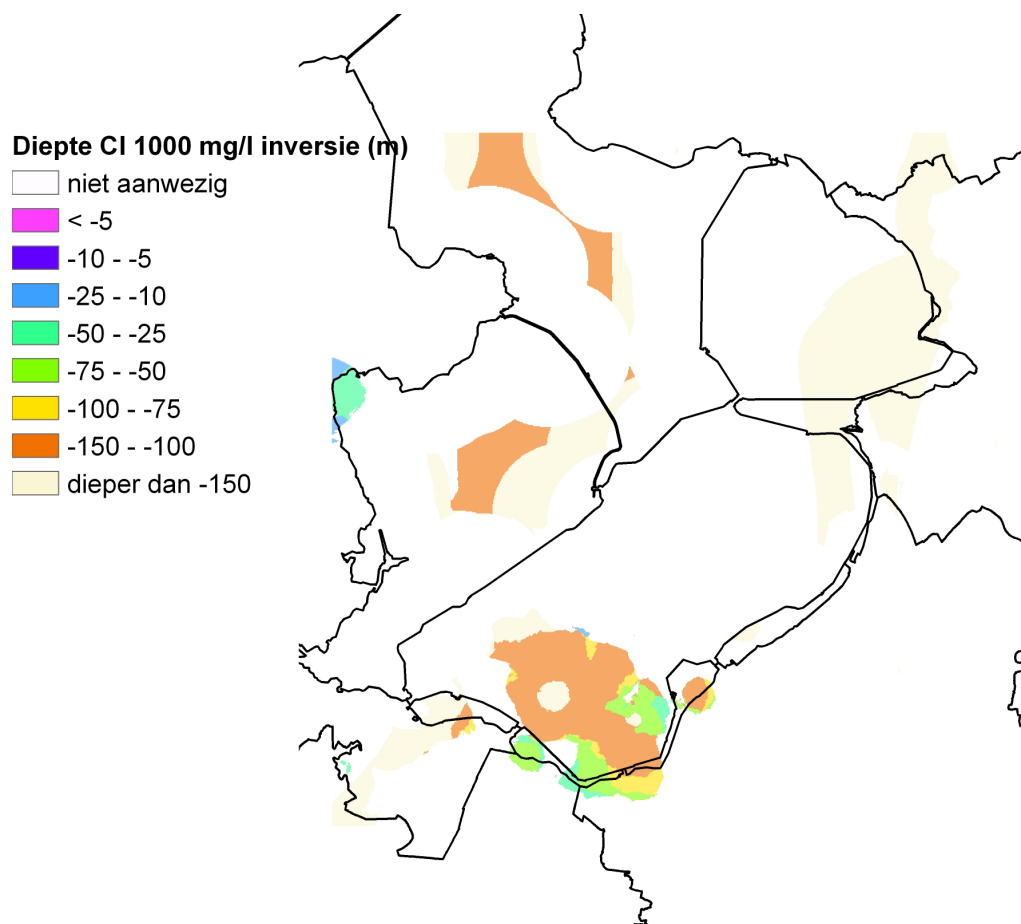
Om meer inzicht te verkrijgen in de ruimtelijke verdeling van chloride concentraties in de ondergrond is de diepte van een aantal grensvlakken tussen zoet, brak en zout grondwater geconstrueerd. In bijlage I staan de grensvlakken afgebeeld van 150 mg Cl⁻/l, 500 mg Cl⁻/l, 1000 mg Cl⁻/l, 1500 mg Cl⁻/l, 2000 mg Cl⁻/l en 2500 mg Cl⁻/l. Hier ligt de focus op het grensvlak tussen zoet en brak grondwater 1000 mg Cl⁻/l, Figuur 23). De grensvlakken zijn verkregen uit de 3D matrix van zoet, brak en zout grondwater, beschreven in paragraaf 5.2.

Uit het figuur blijkt dat brak grondwater zich dicht aan het oppervlak bevindt (-5 tot -15 m diepte t.o.v. NAP) in het midden en zuidelijk deel van de Flevopolders en in het westelijk deel van de Noordoostpolder, wat tevens ook de lagere delen zijn met een dikkere deklaag en die voornamelijk uit klei bestaat (Figuur 2, Figuur 3 en Figuur 6). Aan de oostelijk rand van de Flevopolder bevindt het grensvlak zich het diepst tot meer dan 150 m diepte). Dit zijn ook de hoger gelegen delen, met een dunne deklaag en meer zandvoorkomens (Figuur 2, Figuur 3 en Figuur 6).



Figuur 23: Diepte van het grensvlak 1000 mg/l, tussen brak en zout grondwater.

Met de verkregen 3D matrix van zoet, brak en zout grondwater is het ook mogelijk te bepalen waar inversies van zout-zoet grondwater in het studiegebied aanwezig zijn. Nu is het zo dat het in een kolom grondwater (in de 3D matrix) altijd wel eens voorkomt dat met de diepte de chloride concentratie lager is dan daarboven. Dit betekent in principe dat er eigenlijk in het gehele studiegebied één grote inversie aanwezig is. Om toch meer specificatie aan te geven is er daarom voor gekozen pas te spreken over een inversie tussen zout en zoet grondwater als er ergens met de diepte onder een locatie met een chloride concentratie van groter dan 1000 mg Cl⁻/l een concentratie voorkomt die kleiner is dan 150 mg Cl⁻/l (Figuur 24). In Zuidelijk Flevoland bevindt zich de belangrijkste inversie van het gebied. Hier ligt onder de kleilagen van het glaciële bekken de belangrijke grote zoete grondwatervoorraden van het derde watervoerende pakket. Deze voorraad is gereserveerd voor de drinkwaterwinning van Vitens.



Figuur 24: Locatie en diepte van de inversies in het studiegebied (berekenningsmethode: de diepte van de inversie tussen brak en zoet grondwater is exact daar waar, van bovenaf gezien in elke kolom van 100*100 m², de chloride concentratie afneemt van zout (groter dan 1000 mg Cl/l) naar zoet (kleiner dan 150 mg Cl/l)).

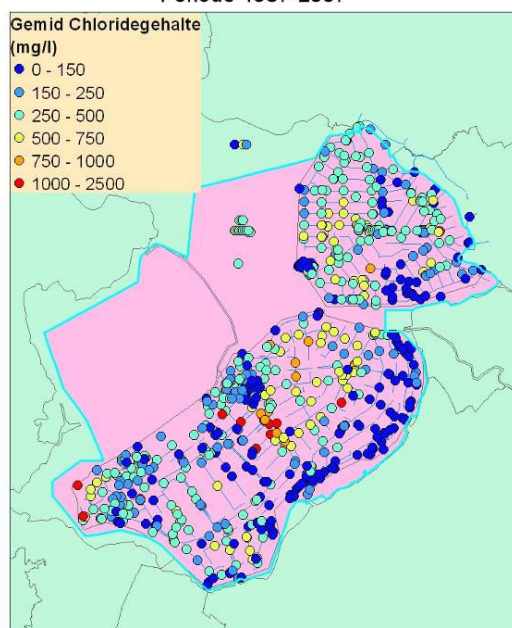
5.5 Chloride concentraties in oppervlaktewater

Om vast te stellen in hoeverre het zoutgehalte van het grondwater bepalend is voor de oppervlaktewaterkwaliteit, is de ruimtelijke spreiding in gemiddelde chloride concentratie van het oppervlaktewater in kaart gebracht. De gemiddelden zijn berekend voor 705 locaties op basis van concentratiereeksen die binnen de periode 1987-2007 vallen. Het aantal metingen waarop deze gemiddelden zijn gebaseerd varieert sterk van 5 tot meer dan 300. De data zijn verkregen van het Waterschap Zuiderzeeland. De gemiddelde chloride concentraties zijn ingedeeld volgens de klassen weergegeven in Tabel 2. Ook zijn het aantal bemonsteringspunten weergegeven die binnen deze klasse vallen. Hieruit blijkt dat het overgrote deel van de locaties waar oppervlaktewater bemonsterd wordt als matig brak kan worden geclassificeerd, gevolgd door zoet.

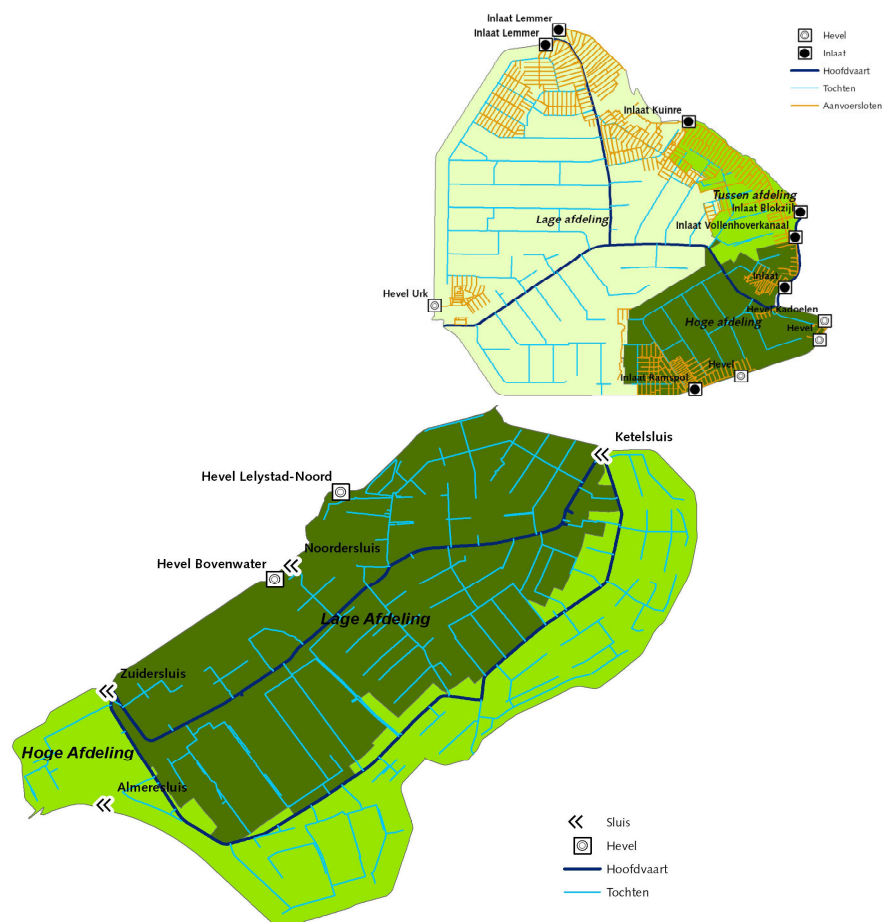
Tabel 2: Klassenindeling chloride concentratie in oppervlaktewater van de Provincie Flevoland.

Klasse	Gemiddelde Chloride conc. (mg/l)	Omschrijving	Aantal locaties in klasse
1	< 150	zoet	205
2	150-250	licht brak	138
3	250-500	matig brak	247
4	500-750	brak	90
5	750-1000	zeer brak	14
6	1000-2500	zout	11

De ruimtelijke spreiding in gemiddelde chloride concentratie is weergegeven in Figuur 26. Hieruit blijkt ook dat het overgrote deel zoet (<150 mg/l) tot matig brak (150-500 mg/l) is. Verder valt op dat patronen in het algemeen vrij goed overeen komen met de patronen die zijn vastgesteld voor het grondwater (op een diepte <2000 cm en 4000-6000 cm) (paragraaf 5.3; Figuur 22). Zo zijn bijvoorbeeld uitgestrekte zones van zoet oppervlaktewater zichtbaar in de gebieden nabij de randmeren, evenals geconstateerd is voor grondwater. Daarnaast is de uitloper van zoet water van Zeewolde tot de Oostervaardersplassen op een diepte van <2000 cm en 4000-6000 cm ook te herkennen in het oppervlaktewater. Brakke (750 -1000 mg/l) en zoute delen (> 1000 mg/l) komen voornamelijk voor in het middendeel van de Flevopolder. De hoogste concentraties bevinden zich ten westen van Almere en langs de Knardijk. Hoge concentraties bij Almere zijn waarschijnlijk gerelateerd aan de hogere concentraties in het grondwater (paragraaf 5.3; Figuur 22). Bij de Knardijk is deze relatie met het grondwater minder duidelijk op basis van vergelijking met Figuur 22. Hogere chloride concentraties zouden hier waarschijnlijk grotendeels veroorzaakt kunnen worden door lozingen in het oppervlaktewater.

Chloridegehalte van oppervlaktewater
Periode 1987-2007

Figuur 25: Ruimtelijke verdeling van de gemiddelde chloride concentratie in de periode 1987-2007 in de Provincie Flevoland onderverdeeld in chloride klassen.

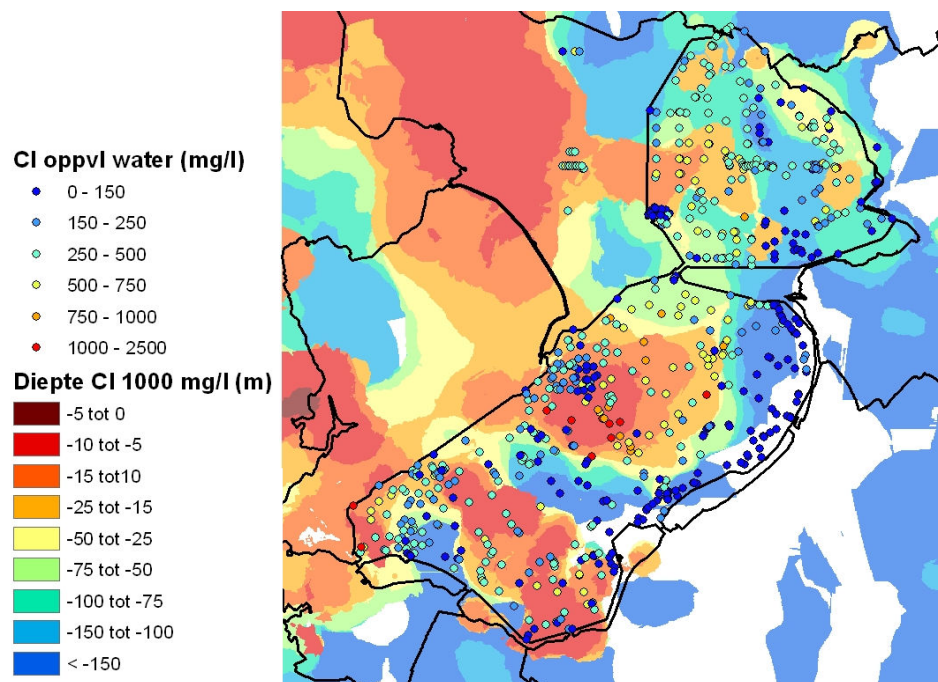


Figuur 26: Ruimtelijke verdeling van de hevels en aanvoergebieden in de Provincie Flevoland.

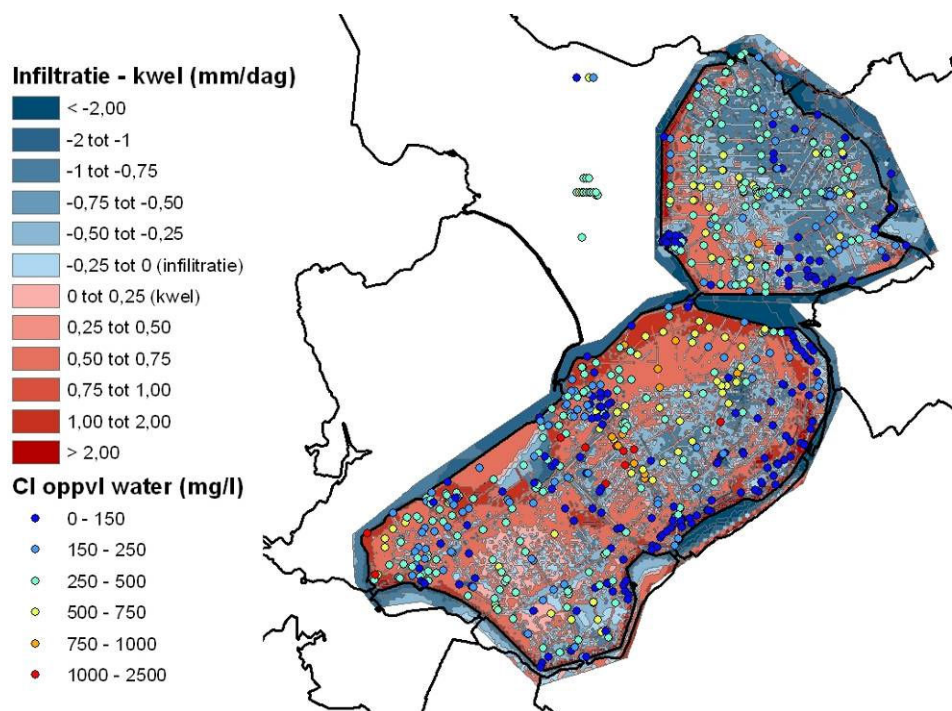
De relatie tussen de chloride concentratie in het oppervlaktewater en grondwater wordt ook enigszins weerspiegeld in Figuur 27, waar de diepte van het grensvlak van chloride van 1000 mg/l is weergegeven. Op locaties waar het oppervlaktewater zoet is, zit het grensvlak in het algemeen diep (> 100 m) terwijl bij sterk brakke of zoute meetpunten het grensvlak vaak vrij dicht onder het oppervlak zit (< 10 m).

Verder valt te verwachten dat de invloed van grondwater op oppervlaktewater-kwaliteit groter is naarmate er meer kwel optreedt, dus in gebieden met infiltratie zou er relatief minder beïnvloeding van de chloride concentraties in grondwater op de oppervlaktewaterkwaliteit moeten zijn. Wel moet bedacht worden dat in vrijwel alle sloten en tochten (ook in infiltratiegebieden) lokaal kwel optreedt als gevolg van de doorsnijding van de deklaag (paragraaf 4.4). Daardoor kan in infiltratiegebieden het oppervlaktewater ook gevoed worden door het grondwater van onderaf. Hierdoor wordt de oppervlaktewaterkwaliteit in het grootste deel van Flevoland beïnvloed door grondwater.

Tenslotte moet gemeld worden dat de stroming van het oppervlaktewater in de waterlopen en de menging van oppervlaktewater en grondwater van verschillende oorsprong en van verschillende kwaliteit een directe correlatie tussen concentratie oppervlaktewater en grondwater niet altijd aantoonbaar is. Zo wordt in de Noordoostpolder en in Lelystad voor het stedelijk water op grote schaal water aangevoerd (Figuur 26). Een groot deel van de afwijkingen tussen grond- en oppervlaktewater-kwaliteit zijn hierdoor te verklaren.



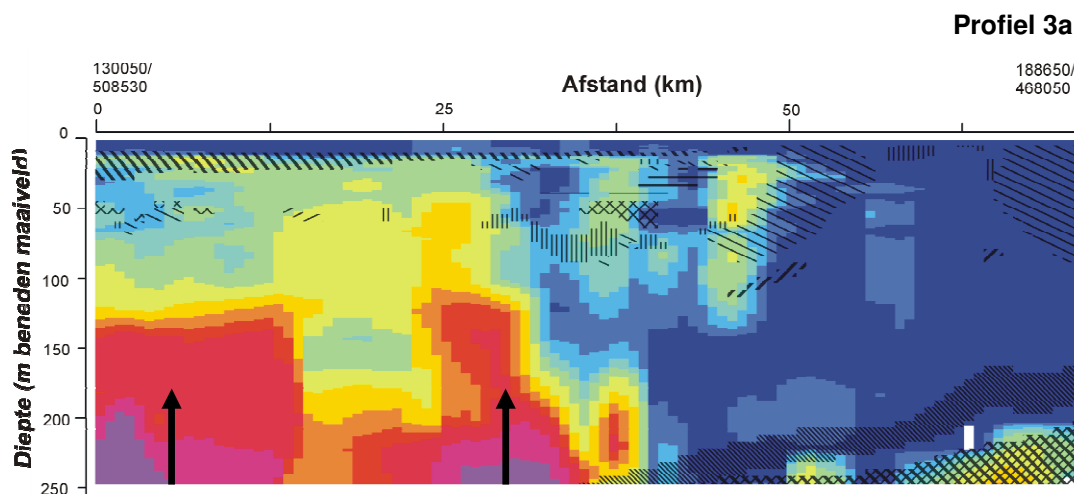
Figuur 27: Diepte grensvlak chloride 1000 mg/l en gemiddeld chloride gehalte oppervlakte water over periode (1987-2007).



Figuur 28: Oppervlaktewater kwaliteit in combinatie met infiltratie- en kwelfluxen.

5.6 Relatie zoet-zout patronen en geologie

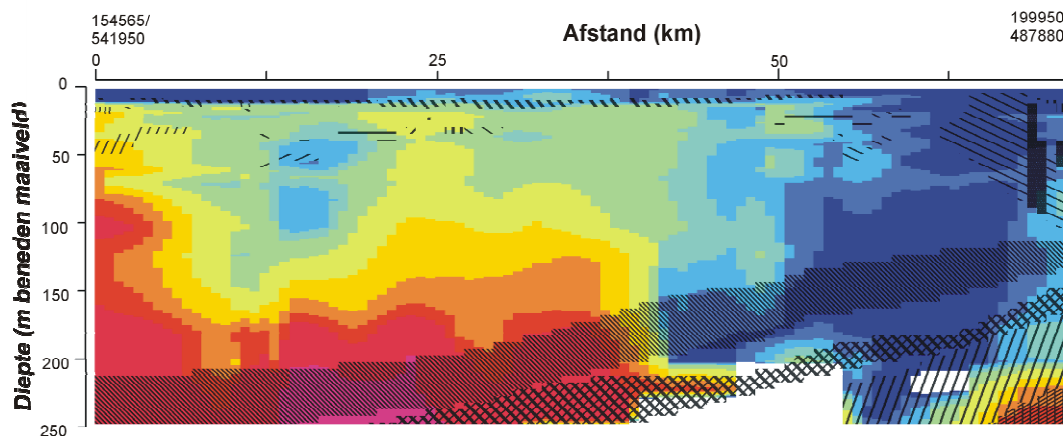
Om de ruimtelijke patronen van chloride concentraties in de ondergrond vast te stellen zijn een flink aantal profielen gemaakt, door de 3D matrix van zoet, brak en zout grondwater. Op basis van de patronen in de diepte van het grensvlak 1000 mg/l (Figuur 23) zijn trajecten gekozen met grote variaties in chloride concentratie. Om te bepalen in hoeverre de geologie, en in het bijzonder de aanwezigheid van scheidende lagen, bepalend zijn voor de chloride concentratie verdeling in de ondergrond, zijn ook de kleilagen (gearceerd) in de profielen weergegeven. Alle profielen zijn weergegeven in Bijlage C. Hierin bevindt zich ook een overzichtkaartje met de ligging van alle profielen. Alle profielen tonen chloride concentratie en aanwezigheid van kleilagen tot een diepte van 0-250m beneden maaiveld en een lengte variërend van 34-92 km. Bij de profielen in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland (1 t/m 5) is goed zichtbaar dat op de plaatsen waar de weerstandslagen (kleilagen van Formatie van Maasluis en Formatie van Waalre) ontbreken of dieper in de ondergrond aanwezig zijn, de chloride concentraties op grote diepte hoog (>10.000 mg/l) zijn. Dit is ter illustratie weergegeven voor profiel 3a in Figuur 29. Hierin is te zien dat in het noordwestelijk (linker) deel de concentraties op grote diepte (250-150 m) zeer hoog zijn en dan afnemen naar brakke condities tot de bovenkant van de scheidende laag (uit Holoceen). Boven deze laag bevindt zich zoet water, waarvan de chloride concentratie sterk is afgenomen als gevolg van afsluiting van de Zuiderzee en vorming van het IJsselmeer. In het zuidoostelijke deel bevindt zich op grote diepte (250-200 m) ook wat zouter grondwater, maar doordat dit is afgesloten door de kleilagen van Formatie van Maasluis en Formatie van Waalre is het grondwater dat zich hierboven bevindt zoet. Ook zorgt de onderbreking van de Holocene scheidende laag dicht onder het oppervlak ervoor dat verzoeting van bovenaf (als gevolg van inpoldering) diep kan doordringen. De bekkenklei in Zuidelijke Flevoland voorkwam diepere infiltratie van zout water gedurende het Holoceen waardoor de watervoerende pakketten onder de bekkenklei zoet zijn gebleven maar boven op de bekkenklei zout grondwater wordt aangetroffen.



Figuur 29: Chloride concentratie en aanwezigheid van kleilagen in de ondergrond bij profiel 3a. De pijlen tonen de doordringing van zoute grondwater van onderaf, doordat weerstandslagen ontbreken of dieper in de ondergrond aanwezig zijn.

De profielen 6 t/m 9 tonen de NW-ZO doorsnedes door de Noordoostpolder. Als voorbeeld is profiel 6 hieronder getoond (Figuur 30). Opvallend is dat de concentratie chloride in de ondergrond in de Noordoostpolder in het algemeen lager is in vergelijking tot Zuidelijk en Oostelijk Flevoland. Ook is te zien dat patronen in chloride concentratie op het eerste gezicht weinig relatie lijken te vertonen met de aanwezigheid van scheidende lagen. Wel is te zien dat bij de onderbreking van de bovenste scheidende laag in het zuidoostelijk deel van profiel 6 de chloride concentraties duidelijk lager zijn. De verzoeting naar het zuidoostelijk deel is echter meer het gevolg van de dominante voeding van zoet water vanuit de Veluwe.

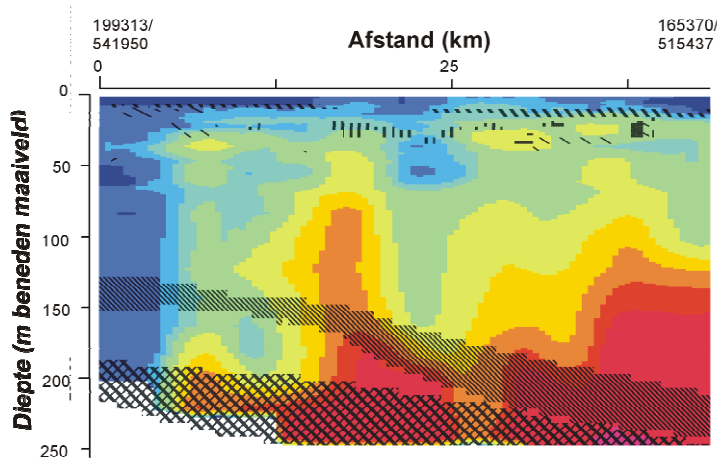
Profiel 6



Figuur 30: Chloride concentratie en aanwezigheid kleilagen in de ondergrond bij profiel 6.

De profielen 10 t/m 13 zijn NO-ZW georiënteerd (staan loodrecht staan op profiel 6-9) en tonen ook zoute condities in de diepte. Als voorbeeld is profiel 12 weergegeven (Figuur 31). Ook hierin is op het eerste gezicht geen duidelijke relatie waar te nemen tussen chloride patronen en de aanwezigheid van kleilagen. De hogere chloride concentraties in de Noordoostpolder in vergelijking tot Zuidelijk en Oostelijk Flevoland kunnen verklaard worden doordat de tweede scheidende laag (zowel SLD 2a als SLD2b) in de Noordoostpolder bijna niet voorkomt, waardoor het zout gemakkelijker verder dringt.

Profiel 12



Figuur 31: Chloride concentratie en aanwezigheid kleilagen in de ondergrond bij profiel 12.

Conclusie

De chlorideprofielen die in deze paragraaf zijn getoond, illustreren mooi de conclusies uit de paleohydrogeografische analyse (hoofdstuk 3). Uit deze paleohydrogeografische analyse is naar voren gekomen dat het zoute grondwater in de bovenste 200 meter van de Provincie Flevoland zeer waarschijnlijk volledig toe te schrijven is aan de transgressies gedurende het Holoceen. De belangrijkste transgressie was die in het vroeg-Holoceen ongeveer 5000 jaar. De deklaag was nauwelijks gevormd, infiltratie van zout water kon gemakkelijk plaatsvinden en werd nog eens versneld door het proces dat dichtheidstroming wordt genoemd. De verzilting was het grootst ter plaatse van de getijdegeulen en was afwezig op hoger gelegen delen die bedekt waren met hoogveen.

In de Noordoostpolder was van mariene invloed pas sprake ten tijde van de aanwezigheid van de Zuiderzee waardoor er slechts een geringe verzilting heeft kunnen plaatsvinden en de zoutgehalten lager zijn dan de voorkomens bij Almere en Lelystad/Dronten.

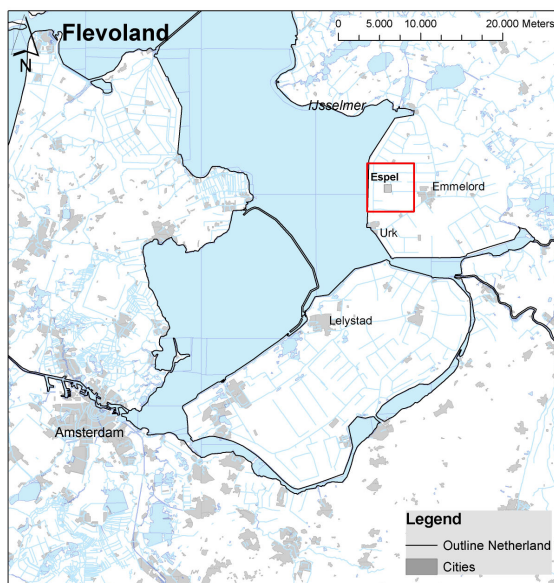
De bekkenklei in Zuidelijke Flevoland voorkwam diepere infiltratie van zout water gedurende het Holoceen waardoor de watervoerende pakketten onder de bekkenklei zoet zijn gebleven maar boven op de bekkenklei zout grondwater wordt aangetroffen.

6 Veldwerk Studie Zoet-zout Grondwater Flevoland

6.1 Inleiding

Naast bestaande meetgegevens is zomer 2007 door Deltares een veldwerk uitgevoerd in de Noordoostpolder, in het gebied ten zuidwesten van Espel (Figuur 34, Bijlage D). In dit gebied is in detail gekeken naar het vóórkomen van zoet, brak en zout grondwater. Het gebied bij Espel is gekozen omdat hier grote verschillen in zoet en zout grondwater in de ondergrond voorkomen en omdat hier verschillende onderzoeksvragen in een klein gebied bestudeerd konden worden.

In de Noordoostpolder wordt op dit moment overal op grotere diepte zout grondwater aangetroffen. Er zijn echter grote verschillen in de diepte waar het zoute grondwater voorkomt. Uit de kartering van Deltares (hoofdstuk 5, paragraaf 5.2) blijkt dat in een zone tussen Creil, Espel, Urk en Schokland het zoute grondwater bijzonder ondiep kan voorkomen (Figuur 23). Ook onder het Kuinderbos wordt het zoute grondwater ondiep aangetroffen. Onder het dorp Espel komt het zoute grondwater op ongeveer -25m NAP diepte voor. Ten noorden en ten noordwesten ligt de grens tussen zoet en zout grondwater veel dieper; op zo'n 100 meter diepte.



Figuur 32: Positie veldwerkcampagne: ten zuidwesten van Espel, Noordoostpolder.

In het gebied ten zuidwesten van Espel zijn middels een veldcampagne verschillende zaken uitzoeken:

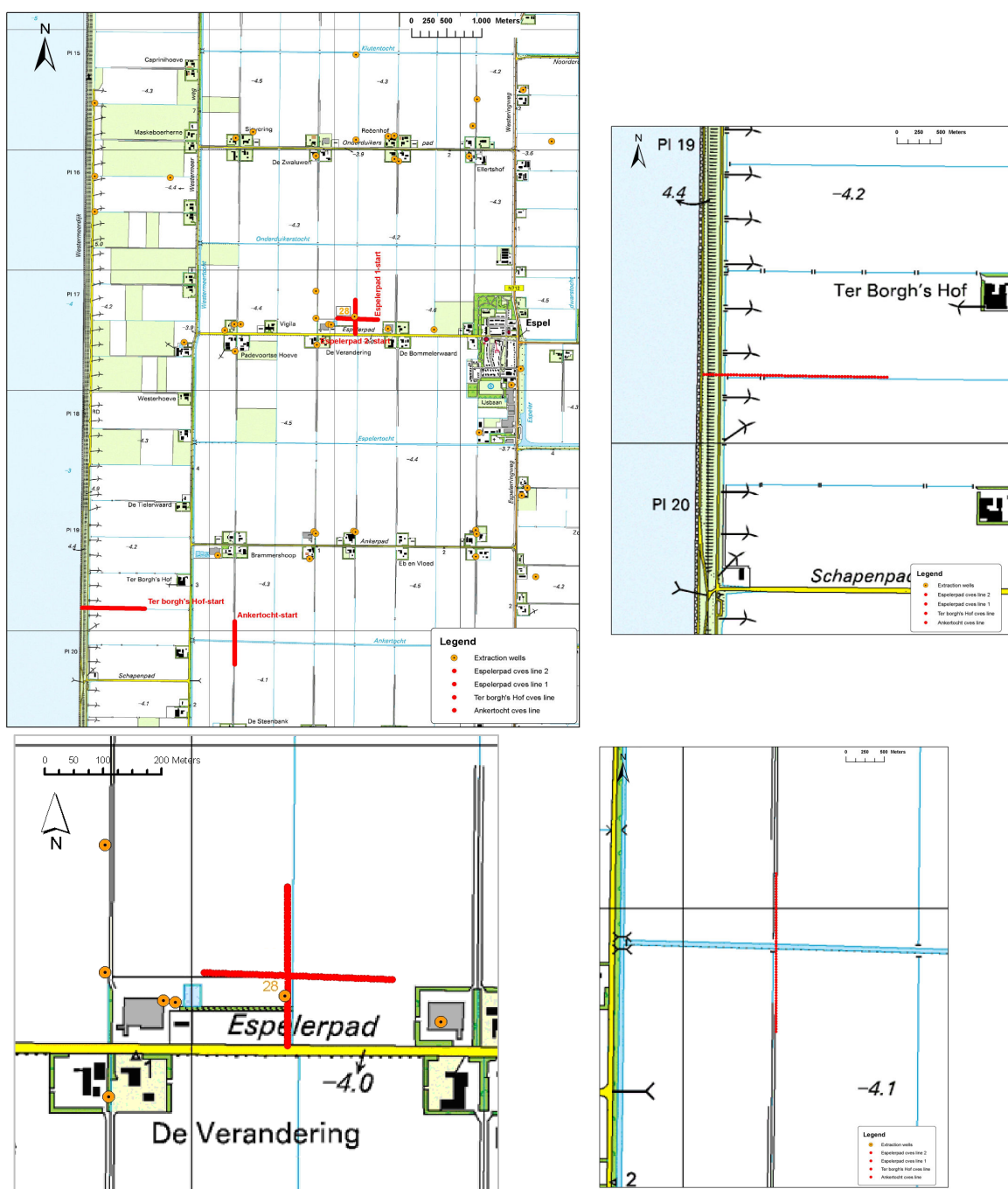
- Hoe is de verspreiding van zoet en zout grondwater in detail?
- Verzoet het grondwater door de kwelstroom vanuit het IJsselmeer?
- Wat is de invloed van de tochten in het gebied? Trekt dit zout grondwater van grotere diepte aan?
- Wat gebeurt er in de buurt van grondwateronttrekkingen? Welke factoren bepalen of zout grondwater in een put komt en hoe lang duurt dit dan?
- Wat is de invloed van de eigenschappen van de ondergrond (verspreiding klei, zand en veen) op verzoeting en verzilting?

6.2 Activiteiten

Verskillende werkzaamheden zijn uitgevoerd om bovenstaande vragen binnen het beschikbare budget zo goed mogelijk te kunnen beantwoorden:

1. Bemonstering onttrekkingsputten en bepaling chloride gehalten (zowel via EC-meting als chloride analyse in het lab) in de putten van het grondwatermeetnet en de onttrekkingsputten (33 in totaal, Bijlage E), met als doel via verspreiding- en dieptekartering te bepalen of brak tot zout grondwater al in de onttrekkingsputten voorkomt (Tabel 3, Tabel 4);
2. Bepaling kwaliteit kwel in tochten en sloten ten zuidwesten van het dorp Espel door middel van meting oppervlaktewaterkwaliteit en een “T-EC prikstok”-meting. Met behulp van de prikstok kan voor elke 10 cm een meting van de temperatuur en elektrische geleidbaarheid van de bodem worden gemeten (tot ongeveer een diepte van 4m is mogelijk, afhankelijk van de bodemopbouw). Hiermee kan informatie worden verkregen over het zoutgehalte van de ondergrond en het stromingspatroon rondom de tochten en de sloten;
3. Geo-electrische metingen ter bepaling van de diepte van zout grondwater door middel van het uitvoeren van Continue Verticale Electriche Sonderingen (CVES) om een indruk te krijgen van het verloop van het zoutgehalte met de diepte (Figuur 33). Een goede beschrijving van de ondergrond (bestaande boringen) en een goede schatting van het bi-carbonaatgehalte van het grondwater zijn belangrijk voor een realistische schatting van het zoutgehalte. De betrouwbaarheid neemt met de diepte af. Er is in vier 2D profielen gemeten:
 - Eén 2D-profiel in de buurt van de dijk om te bepalen in hoeverre zoete kwel uit het IJsselmeer van invloed is op de verzoeting van het grondwater;
 - Eén 2D-profiel op een perceel in de buurt van een tocht om te bepalen hoe infiltratie vanuit het perceel en kwel naar de tocht verzoeting en verzilting bepalen;
 - Twee 2D-profielen bij een onttrekkingsput om te bepalen hoe verzilting een onttrekking kan bedreigen.

De resultaten van deze metingen worden bekendgemaakt aan de landeigenaren in het gebied. Degenen die hun put laten bemonsteren krijgen het resultaat van de analyse opgestuurd.

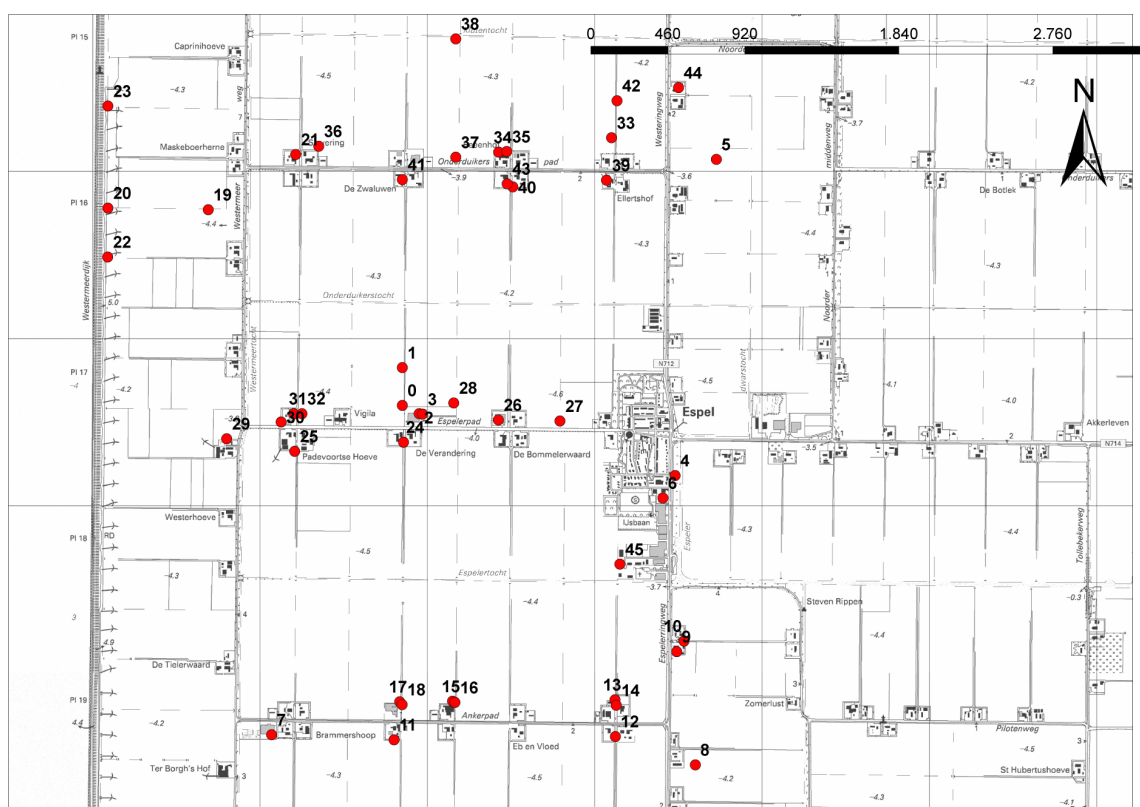


Figuur 33: Locaties CVES metingen.

6.3 Resultaten

6.3.1 Bemonstering onttrekkingsputten en bepaling chloride gehalten

Directe bemonstering van de onttrekkingsputten heeft veel informatie gegeven over het zoutgehalte in de ondergrond. De bemonstering is gebeurd door een flesje water te tappen via de pompinstallatie van de put. Informatie over de diepte van de bron, diameter van de put, en over de wijze van gebruik (wordt veel ineens onttrokken of regelmatig met een klein debiet) is eveneens verzameld. Figuur 34 toont een overzichtkaart met alle putten die Deltares in samenspraak met de Provincie Flevoland heeft bemonsterd.



Figuur 34: Overzichtskaart met locaties te bemonsteren onttrekkingsputten.

In Tabel 3 en Tabel 4 staan de stoffenanalyses zoals in het laboratorium bepaald, van de bemeten onttrekkingsputten. Van een aantal putten op de oorspronkelijke lijst (zoals weergegeven in Figuur 34) zijn geen analyses gedaan, wegens uitlopende redenen. Zo staan op de lijst een tweetal ‘eigenaars’ die in werkelijk niet de eigenaar van de desbetreffende put; zijn er een viertal paar eigenaars afwezigheid op bewuste meetdag; en hebben een viertal eigenaars absoluut geen behoefte om mee te doen aan deze meetcampagne; zijn er twee putten meer in werking (geen pomp aanwezig), en is er één put nog niet geslagen.

Figuur 35 toont twee overzichtskaarten met de desbetreffende metingen, gelegen in het studiegebied: Figuur 35a. toont het nummer van de onttrekkingsput en Figuur 35b. de exacte chloride concentratie van de onttrekkingsput. De chloride gehalten zijn behoorlijk hoog, in bijna alle putten zelfs boven de zoet-brak grens, zoals gedefinieerd door Stuyfzand (1993). In de putten dichtbij het IJsselmeer, ten noordwesten van Espel,

wordt zoet tot licht brak grondwater onttrokken. Alhoewel als verklaring kan worden gegeven dat het hier intrusie van zoet IJsselmeerwater betreft, is het waarschijnlijker dat het hier ‘toevallig’ vanuit het verleden zoet grondwater in de ondergrond aanwezig is. De zoet-zout kartering, zoals gedaan door Deltares onderbouwt deze theorie (Figuur 35). Een datering van het onttrokken grondwater zou hierover uitsluitsel kunnen geven.

Tabel 3: Concentraties van een aantal stoffen in 31 bemeten onttrekkingsputten.

putnummer	Cl	F	NO2	Br	NO3	SO4	EC	temp
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µS/cm	oC
0	998.28	< 0	< 0	3.3	< 0	< 0	3780	19.7
2	1119.88	< 0	< 0	3.51	< 0	< 0	4110	13.8
3	1002.91	< 0	< 0	3.49	< 0	< 0	3760	20.0
6	1127.61	< 0	< 0	3.11	< 0	< 0	4380	14.9
8	1367.27	< 0	< 0	4.88	< 0	< 0	5010	12.2
9	1315.21	< 0	< 0	4	< 0	< 0	4740	15.7
10	1101.61	< 0	< 0	3.35	< 0	< 0	4060	17.2
11	1656.12	< 0	< 0	5.48	< 0	< 0	5970	13.3
12	1277.75	< 0	< 0	3.68	< 0	< 0	4650	13.7
13	1189.44	< 0	< 0	3.27	< 0	< 0	4330	4.5
14	1193.55	< 0	< 0	3.66	< 0	< 0	4330	13.2
17	1740.23	< 0	< 0	5.29	< 0	< 0	6250	17.2
19	108.97	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	899	13.0
20	171.26	< 0	< 0	< 0	< 0	19.49	1034	15.6
21	335.42	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	1634	14.1
22	166.7	< 0	9.12	< 0	< 0	8.17	1018	12.8
23	161.69	< 0	< 0	< 0	< 0	2.01	1068	13.2
24	1407.47	< 0	< 0	4.1	< 0	< 0	4930	13.9
25	1184.54	< 0	10.92	3.57	< 0	< 0	4210	19.5
27	277.6	7.27	2.05	< 0	35.39	315.78	2550	18.3
28	900.43	< 0.02	< 0.07	3.71	< 0.06	< 0.12	3590	19.3
29	1337.36	< 0.02	< 0.07	5.99	< 0.06	10.26	4730	17.0
30	271.7	< 0	< 0	< 0	< 0	21.81	1253	15.8
31	763.86	< 0	< 0	2.25	< 0	< 0	2570	17.1
34	1198.4	< 0	< 0	3.77	< 0	< 0	4310	12.6
35	1073.15	< 0	< 0	2.98	< 0	< 0	3910	13.0
36	493.97	< 0	< 0	1.63	< 0	< 0	2100	15.4
37	1653.27	< 0	4.9	5.2	1.53	7.01	5730	14.0
39	1512.02	< 0	< 0	4.73	< 0	< 0	5450	13.0
40	835.45	< 0	< 0	2.41	< 0	< 0	3240	13.3
43	1277.41	< 0	< 0	3.85	< 0	< 0	4630	13.9

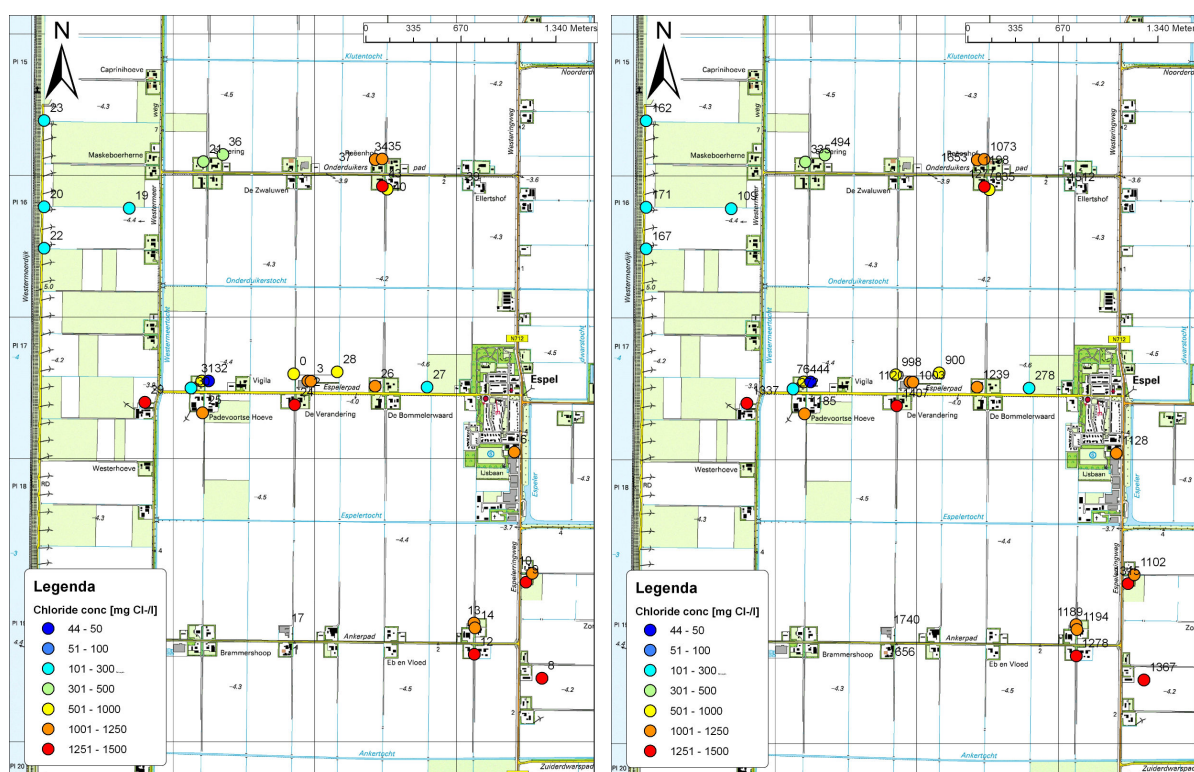
Tabel 4: Uitgebreide concentraties van een aantal stoffen in twee bemeten onttrekkingsputten, van landeigenaren waar ook de CVES-metingen hebben plaatsgevonden.

	HCO ₃ ⁻	pH	Ec	F	Cl	NO ₂	Br	NO ₃	SO ₄	NH ₄
putnummer	mg/L		μS/cm	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	μmol/L
26	539.87	7.53	4540	< 0.01	1239.98	< 0.07	4.93	< 0.06	< 0.04	450.0
32	95.65	7.87	460	< 0.07	44.06	0.20	0.10	0.75	83.25	20.1

	Al	B	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li
putnummer	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
26	0.058	0.141	0.489	231.734	0.001	< 0.004	0.046	22.836	19.735	0.027
32	0.095	0.019	0.02	49.555	< 0.001	< 0.004	0.001	1.237	5.622	0.004

	Mg	Mn	Na	Ni	P	S	Sc	Si	Sr	Ti
putnummer	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
26	80.876	0.491	514.62	0.007	0.542	0.494	0.003	12.551	0.928	< 0.005
32	7.101	0.06	26.366	< 0.004	0.084	30.133	0.003	1.164	0.213	0.005

	V	Y	Zn	temp
putnummer	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	°C
26	< 0.006	< 0.002	0.281	15.8
32	< 0.006	< 0.002	0.007	19.2



Figuur 35: Overzichtskaart met locaties, a. nummer en b. exacte chloride concentratie in mg Cl/l van de bemonsterde onttrekkingsputten.

6.3.2 Bepaling kwaliteit kwel in tochten en sloten ten zuidwesten van het dorp Espel

De prikstok is een metalen stok met aan het uiteinde sensoren voor het meten van de temperatuur (T) en de elektrische geleidbaarheid (EC) (Figuur 36). De EC-waarden worden onder anderen beïnvloed door porositeit, bodemmateriaal en zoutgehalte van het grondwater. Hoe hoger het zoutgehalte hoe beter geleidbaar het grondwater is. De invloed van het bodemmateriaal en het instrument op de EC-waarden worden gecorrigeerd (zie de paragrafen 6.3.2.1 en 6.3.2.2) om vergelijkbare geleidbaarheids- en chloride concentraties te verkrijgen.

De prikstok wordt op de gewenste plek met de hand in de sloot of tocht worden geduwd. Deze meting wordt langs de waterkant gedaan. De prikstok is een klein apparaat; er is geen voertuig nodig voor het transport. Met behulp van de peilschaal die in de stok gegraveerd is wordt de diepte bepaald en wordt iedere 10 cm een EC en T waarde genoteerd. Elke keer dat de stok verder wordt geduwd moet 1 à 3 minuten gewacht worden om de EC en T waarden in te laten stellen. Aan de hand van deze gegevens worden de chloride concentraties van het grondwater bepaald en in kaart gebracht (dwarsprofielen). Hoe de EC-waarden zich met de chloride concentraties verhouden wordt beschreven in paragraaf 6.3.2.2.



Figuur 36: De T-EC prikstok in het veld.

6.3.2.1 Formatieconstante

Naast het zoutgehalte is de geleidbaarheid van de bodem ook erg afhankelijk van de grondsoort. Een zandbodem heeft bijvoorbeeld een veel lagere geleiding dan een veenbodem. Wanneer de vertaalslag gemaakt wordt van EC naar chloride concentratie, is het dus uiterst belangrijk om te weten in welke grondsoort de betreffende EC gemeten is. De gegeven EC-bodemprofielen kunnen dus niet rechtstreeks vertaald worden naar chloride concentratie profielen.

De mate waarin een grondsoort de geleidbaarheid bepaalt wordt uitgedrukt door een formatieconstante. Dit is een dimensieloos getal dat berekend kan worden door de EC van grondwater (bepaald met een dompelcel) van de eerste verzadigde bodemlaag onder maaiveld te delen door de EC die de prikstok in diezelfde grondlaag meet. In dit gebied varieert de formatieconstante over het algemeen tussen de waarden 1.0 en 4.25. Vanwege de verschillende manieren van meten tussen prikstok en dompelcel dient de prikstok-EC eerst nog vermenigvuldigd te worden met een correctiefactor. Deze ligt rond de 0.4. Er geldt dus:

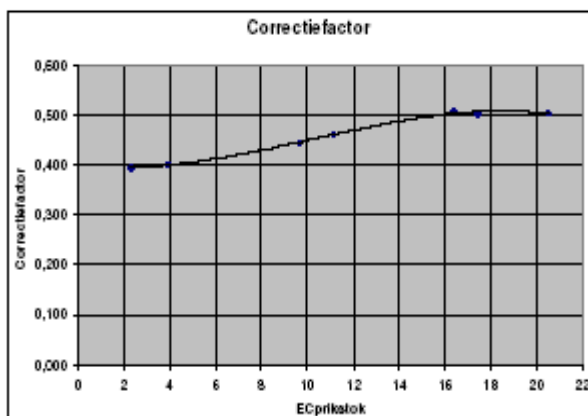
$$\text{Formatieconstante} = EC_{\text{dompelcel}} / (EC_{\text{prikstok}} * 0.4)$$

De correctiefactor kan worden uitgerekend door in ruim water prikstok en dompelcel naast elkaar te houden en zo de gemeten waarde van de dompelcel te delen door die van de prikstok. Bestaande handleidingen van de prikstok gaven aan dat deze factor altijd gelijk is, namelijk 0.4 (van Wirdum, 2004). Tijdens het meten bleek dit echter niet te

kloppen. De factor bleek afhankelijk te zijn van het geleidingsvermogen van de stof waarin gemeten wordt (Figuur 37). Gekozen is om een factor van 0.4 te gebruiken voor prikstok-EC's van 0 tot 4 mS/cm (1 mS/cm=1000µS/cm) en een factor van 0.5 voor prikstok-EC's van 16 mS/cm en hoger. Voor prikstok-EC's die tussen de 4 en 16 mS/cm liggen wordt de factor voorgesteld als lineair oplopend van 4 tot 16. Hiervoor is de volgende formule opgesteld:

$$\text{Correctiefactor} = 0.00833 * EC_{\text{prikstok}} + 0.36667$$

Het feit dat een hogere correctiefactor wordt gemeten bij hogere EC-waarden wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de geleidbaarheid van de grond zo groot is dat het stroomlijnenveld dusdanig uitrekt dat de geleidbaarheid van het metaal van de prikstok een rol gaat spelen.



Figuur 37: Verloop correctiefactor voor de EC van de prikstok.

6.3.2.2 Berekening chloride concentratie met de prikstok

Aan de hand van de gemeten prikstok EC-waarden kan de chloride concentratie van het grondwater van dat punt bepaald worden. Stel dat in een bodemlaag een waarde gemeten wordt van A µS/cm. Wanneer de meting gedaan is in ruim water kan de werkelijke EC van het water uitgerekend worden door de gemeten waarde te vermenigvuldigen met de correctiefactor 0.4 (zie paragraaf 6.3.2.1).

Als de gevonden EC in µS/cm niet veel groter is dan 2000-5000, is het kation en de anionconcentratie ruwweg (0.01 * correctiefactor * A) mmol/l. Als chloride (molgewicht 35.5) het dominante anion is, en als hier 75% van de negatieve lading aan wordt toegekend, dan is (van Wirdum, 2004):

$$\text{Chloride concentratie (mg/l)} = (35.5 * 0.75 * 0.01 * \text{correctiefactor} * A)$$

(van Wirdum, 2004).

Als de meting niet in water maar in een bodemlaag is gedaan, wordt de waarde vervolgens nog vermenigvuldigd met de formatieconstante van de desbetreffende bodemlaag.

6.3.2.3 Chloride concentraties in enkele putten van het provinciaal meetnet

Rond Espel ligt het brakke-zoute grondwater in noordoost-zuidwest richting ondiep (Figuur 23); op zo'n -25m NAP; in de buurt van het Ankerpad op ongeveer 50 meter onder NAP, bij het onderduikerspad op ongeveer 100 tot 150 meter onder NAP. Tabel 5 toont de chloride concentraties in een drietal putten. Zoet grondwater wordt

aangetroffen in de put 15G0070, nabij het IJsselmeer; en brak tot zout grondwater in de putten 20E00044 en 20F0052. De getallen komen overeen met het patroon in Figuur 35.

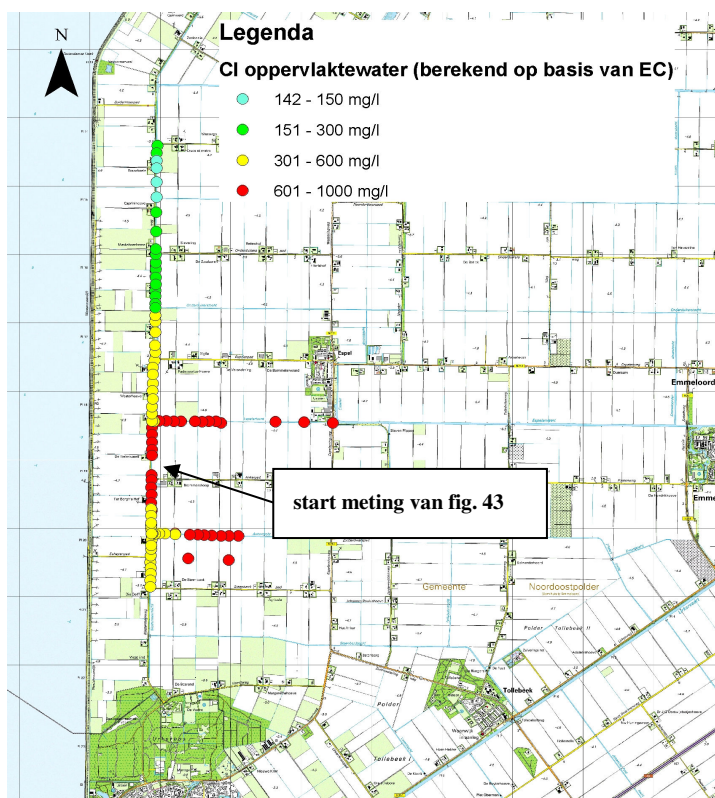
Tabel 5: Chloride concentraties in een drietal putten.

Putcode	FiltNr	Datum	Xcoor	Ycoor	Bk filt	Ok filt	PARNAME	Waarde	Eenheid
15G0070	1	22-01-2003	169050	528800	6	7	Chloride	155	mg/l
15G0070	1	28-10-1998	169050	528800	6	7	Chloride	165	mg/l
20E0044	1	30-10-1996	169200	524880	16,3	17,3	Chloride	1900	mg/l
20E0044	1	10-09-1985	169200	524880	16,3	17,3	Chloride	2350	mg/l
20F0052	1	30-10-1996	171500	524750	17,11	18,11	Chloride	1300	mg/l
20F0052	1	01-11-1990	171500	524750	17,11	18,11	Chloride	1278	mg/l

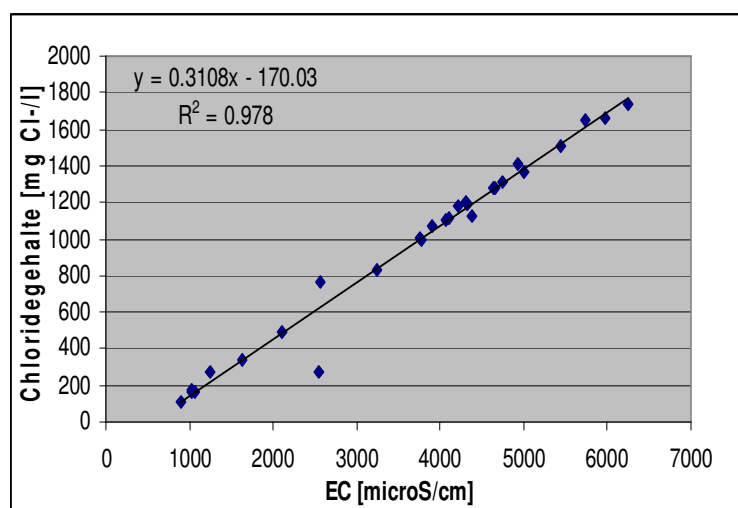
6.3.2.4 Chloride concentraties in oppervlaktewater

Met behulp van het Waterschap Zuiderzeeland heeft Deltares in de periode 20-27 juli 2007 in een aantal tochten de elektrische geleidbaarheid EC gemeten (Figuur 38). Dit is ongerekend naar chloride concentraties (Figuur 39). In Figuur 38 is duidelijk te zien dat het oppervlaktewater behoorlijk brak tot zout is. De hoogste concentraties zijn te vinden in het zuiden (zie ook Figuur 40). In het bemeten noordelijk deel van de Westermeertocht dat relatief zoet is (Figuur 38), komt ook uit de onttrekkingsputten zoet grondwater omhoog (Figuur 35), terwijl de 3D zoet-zout kartering hetzelfde patroon aangeeft (Figuur 42).

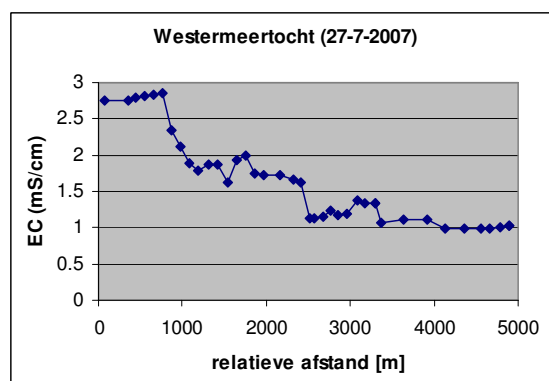
Figuur 41 toont op een tweetal locaties de verdeling van zoet-brak-zout grondwater in de diepte. Het temperatuurpatroon vertoont een mooie gradient met de diepte: in de zomer warm bovenin (18-19 °C) en koud onderin (13.5-14.5 °C). Relatief koud grondwater zal waarschijnlijk in de tocht opwellen als koude, zoute kwel. Bij de elektrische geleidbaarheid EC is veel minder duidelijk een gradiënt te ontdekken.



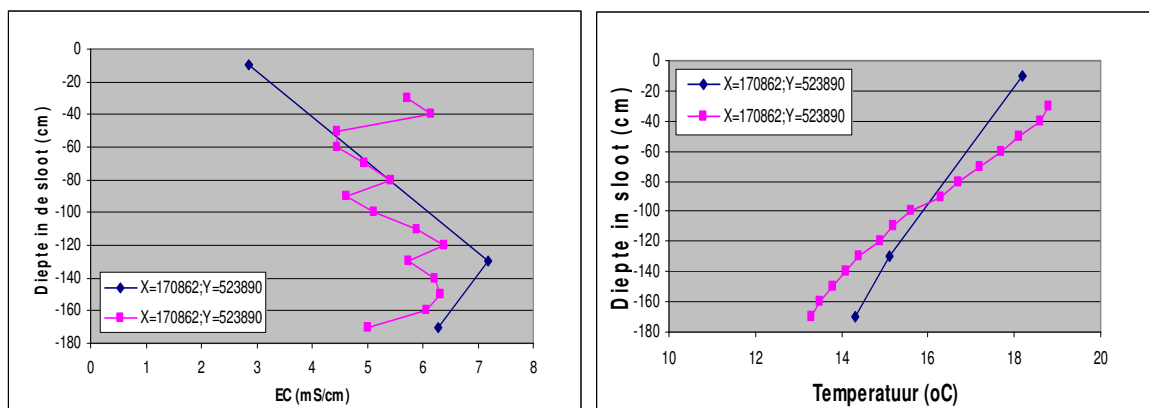
Figuur 38: Chloride concentraties van het oppervlaktewater in een aantal tochten in het studiegebied, bemeten over de periode 20-27 juli 2007. Gebaseerd op deze resultaten is de CVES nabij Ankertocht gekozen.



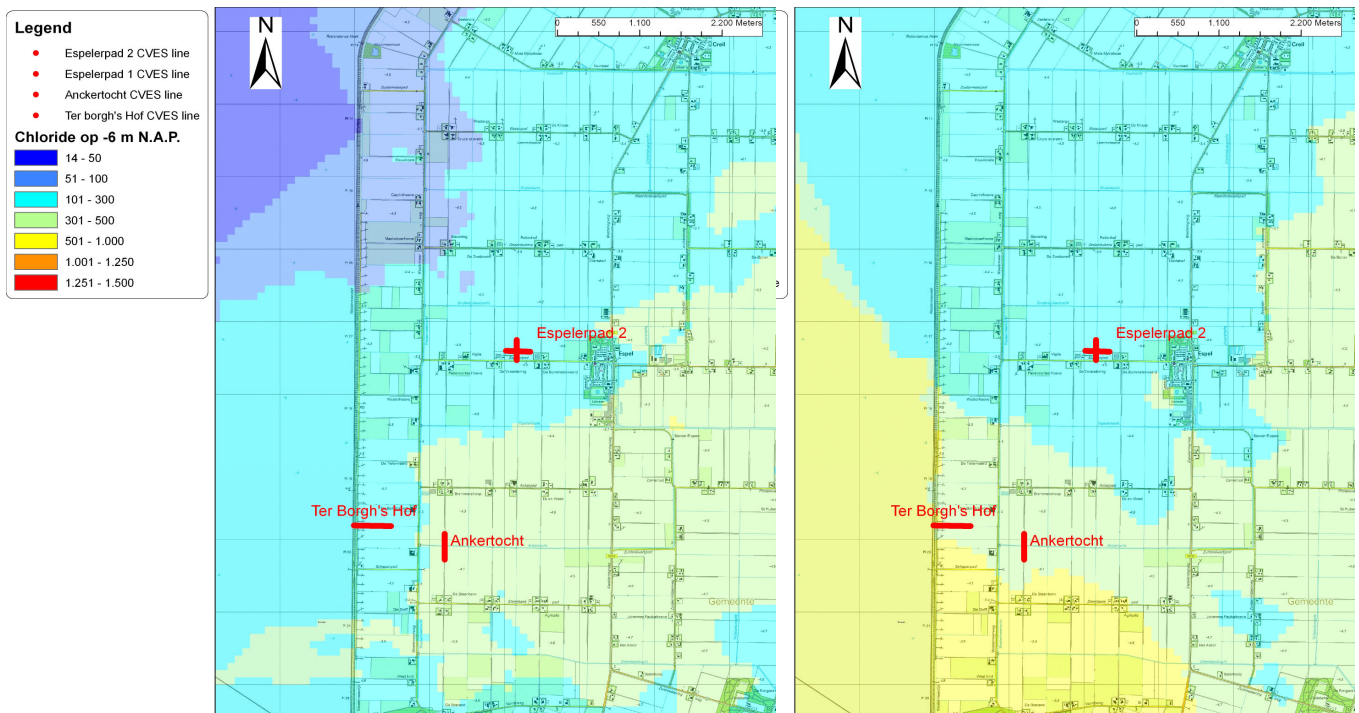
Figuur 39: Binnen het gebruikte interval is er een sterke correlatie tussen chloride concentratie in mg Cl-/l en Elektrische geleidbaarheid EC in $\mu\text{S/cm}$ ($1000 \mu\text{S/cm} = 1 \text{mS/cm}$). Er lijkt één waarde af te wijken: het betreft putnummer 27; de afwijking kan verklaard worden door de bijzonder hoge concentraties van enkele overige gemeten ionen in deze put als NO_3 (35.39 ppm) en SO_4 (315 ppm) (1 ppm is ongeveer gelijk aan 1 mg/l).



Figuur 40: Elektrische geleidbaarheid (EC in mS/cm) in het oppervlaktewater op 27 juli 2007 over een traject van 5 km. Relatieve afstand in noordelijke richting vanaf het punt X=[169879m, 524708m].



Figuur 41: Elektrische geleidbaarheid (EC in mS/cm) en temperatuurprofiel op een tweetal locaties in het oppervlaktewater.

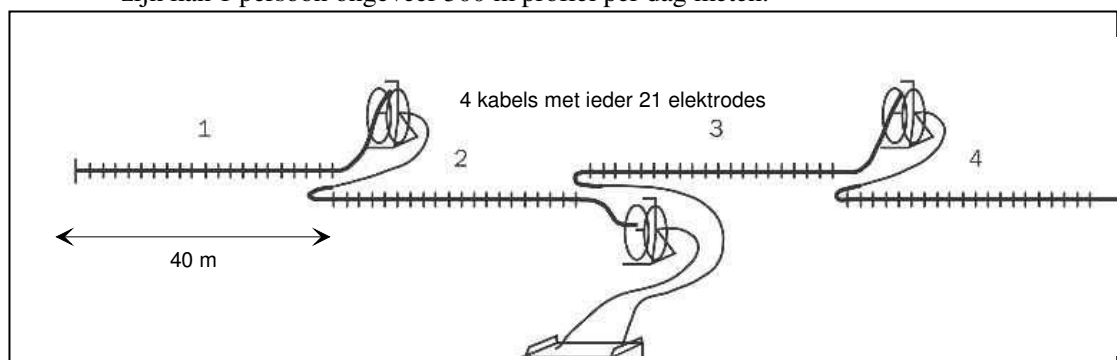


Figuur 42: Resultaat 3D zoet-zout kartering op -6 en -9 m NAP

6.3.3 Geo-elektrische profielen voor bepaling brak-zout grensvlak

6.3.3.1 Achtergrond 2D geo-elektriek (CVES)

CVES metingen (Continue Verticale Elektrische Sonderingen) zijn geo-elektrische metingen langs een profiel vanaf het oppervlak. In het veld worden vier 40 meter lange kabels uitgelegd met aan iedere kabel 20 elektrodes. De totale meetopstelling is 160 m lang en bestaat uit 80 actieve elektrodes (Figuur 43). De elektrodes kunnen zowel als stroom- en als potentiaalelektrode gebruikt worden. Met behulp van het geo-elektrische meetapparaat wordt een serie metingen uitgevoerd waarbij telkens via twee verschillende stroomelektrodes een stroom in de grond wordt gebracht, terwijl het potentiaalverschil over twee andere potentiaalelektrodes wordt gemeten. Na de metingen wordt er achter de vierde kabel een nieuwe kabel aangekoppeld en wordt de eerste kabel los gehaald. Vervolgens wordt er een nieuwe meting uitgevoerd. Dit gaat net zo lang door totdat het hele profiel is gemeten. Als de veldomstandigheden goed zijn kan 1 persoon ongeveer 500 m profiel per dag meten.



Figuur 43: Een Continue Verticale Elektrische Sondering (CVES).

Het potentiaalverschil, de stroomsterkte en een constante, die afhankelijk is van de gebruikte meetopstelling, leveren vervolgens, met behulp van de wet van Ohm, de schijnbare weerstand van de ondergrond. De gemeten schijnbare weerstanden zijn gemiddelden over de bovenste lagen van de ondergrond. Naarmate de buitenste stroomelektrodes verder uit elkaar staan kan er dieper de grond in worden “gekeken”. De data worden vervolgens met behulp van een computerprogramma (SensInv2D, www.crosswellinstruments.de) omgerekend (geïnverteerd) naar werkelijke geo-elektrische weerstanden van de ondergrond. Het resulterende 2D profiel bestaat uit, voor iedere positie op het profiel, de diepte en de werkelijke elektrische weerstand van de ondergrond. De elektrische weerstand geeft informatie over de lithologie (klei, zand, grind) van de ondergrond en het zoutgehalte van het grondwater.

6.3.3.2 *Beperkingen geo-elektriek*

Er zijn een paar dingen waar rekening mee moet worden gehouden bij geo-elektrische metingen:

- Geo-elektriek is alleen zinvol als er een voldoende contrast is in geo-elektrische weerstand tussen de te onderscheiden lagen. Een dergelijk contrast is bijvoorbeeld duidelijk aanwezig tussen zand met zoet grondwater en zand met zout grondwater. Dat contrast is niet of nauwelijks aanwezig tussen klei en zand met zoutwater;
- Geo-elektrische metingen ondervinden storende invloeden van geleidende objecten aan of nabij het oppervlak. De aanwezigheid van kabels of leidingen is dus ongewenst;
- Het detecteren van lagen met hoge weerstand onder lagen met lage weerstand geeft problemen. Een voorbeeld hiervan zijn zoet-zout inversies;
- Omdat het metingen zijn die vanaf het oppervlak worden genomen neemt de resolutie van de kartering af met de diepte. Bijvoorbeeld, een 1m dikke kleilaag binnen een zandpakket kan goed worden gekarteerd op een diepte van 5m of minder. Een laag met deze dikte zal over het algemeen niet meer worden waargenomen op 15m diepte.

6.3.3.3 *Schatting diepte 2000 mg/l chloride grensvlak*

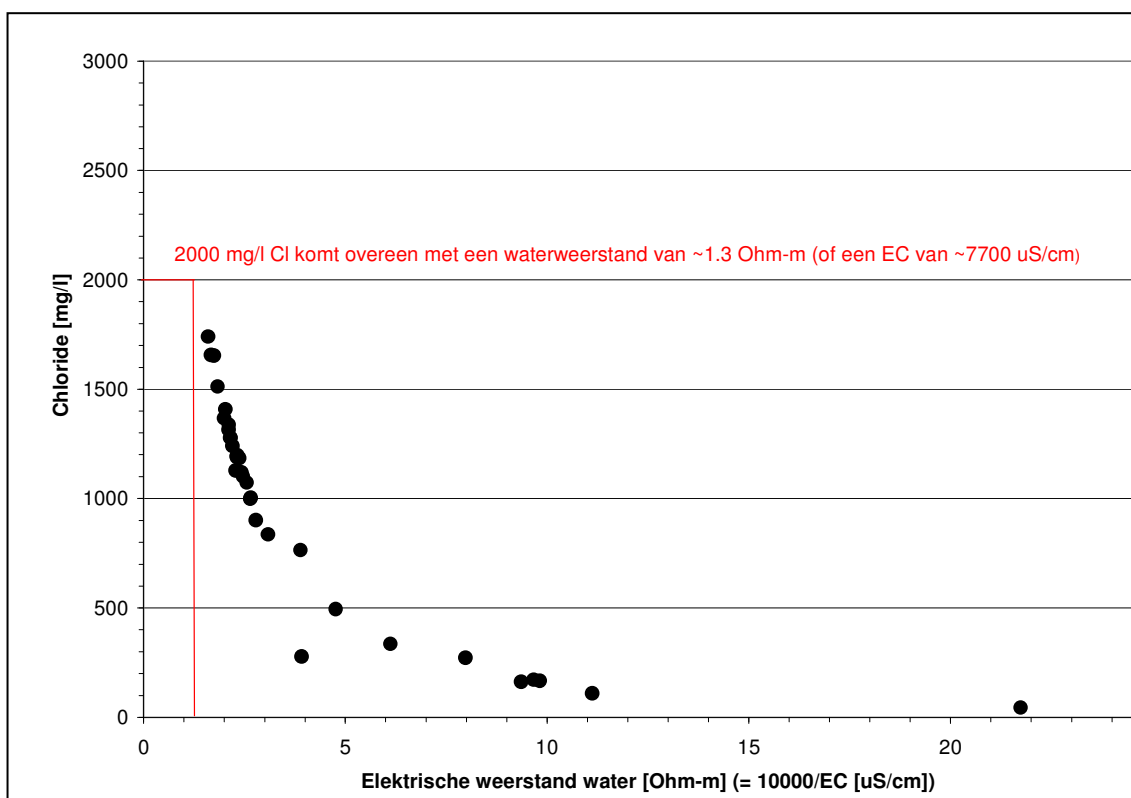
Het brak-zout grensvlak (chloride concentratie=1000 mgCl⁻/l) zit in alle gemeten profielen zeer ondiep of is nauwelijks aanwezig (zie hieronder) daarom is geprobeerd de diepte van het 2000 mg/l chloride grensvlak te schatten. De diepte van dit grensvlak wordt als volgt geschat op basis van de geo-elektrische profielen. Uitgaande van de empirische relatie tussen de elektrische weerstand van het grondwater van de putten in het gebied (dit is het omgekeerde van de EC of elektrische geleidbaarheid) en de gemeten chloride concentratie is voor een chloride concentratie van 2000 mg/l de elektrische waterweerstand geschat op ongeveer 1.3 Ohm-m (Figuur 44). Voor verschillende typen sediment kan met behulp van de formatiefactor (F) de elektrische weerstand van de verzadigde ondergrond worden berekend ($R_{\text{bodem}} = F \times R_{\text{water}}$) (tabel 6). De elektrische weerstand van de ondergrond is hetzelfde als de weerstand die met behulp van de CVES meting geschat wordt (na inversie). De berekening is uitgewerkt voor verschillende typen sediment in onderstaande Tabel 6. Dus de 2000 mg/l chloride overgang ligt, uitgaande van een waterverzadigde ondergrond, tussen de 2 (kleiig sediment) en 3.5 (zandig sediment) Ohm-m. Omdat de Holocene deklaag behoorlijk kleiig kan zijn is een gemiddelde grenswaarde van ~2.5 Ohm-m aangehouden. Bovenstaande berekening gaat niet goed op bij zeer kleiig sediment omdat dan sprake is van een 'schijnbare' formatie factor die niet meer constant is maar varieert met de geleidbaarheid van het grondwater.

Tabel 6: Verzadigde bodemweerstand voor het 2000 mg/l chloride grensvlak voor verschillende typen water verzadigd sediment (10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ =10 mS/cm=1 Ohm-m)

Sediment	Formatie Factor (F)*	Chloride (mg/l)	R water (Ohm-m)	R bodem (Ohm-m)
Grof zand	5	2000	1.3	6.5
zand	3.5	2000	1.3	4.6
Fijn zand	3	2000	1.3	3.9
Matig slibhoudend zand	2.5	2000	1.3	3.3
Sterk slibhoudend zand**	2	2000	1.3	2.6
Klei**	1 tot 3	2000	1.3	2.0
Veen	1	2000	1.3	1.3

* bron: o.a. Geirnaert en Vandenberghe, 1988; Overmeeren et al, 1991; TNO, 1992 (empirische waarden).

** schijnbare Formatie Factor (varieert met geleidbaarheid grondwater).



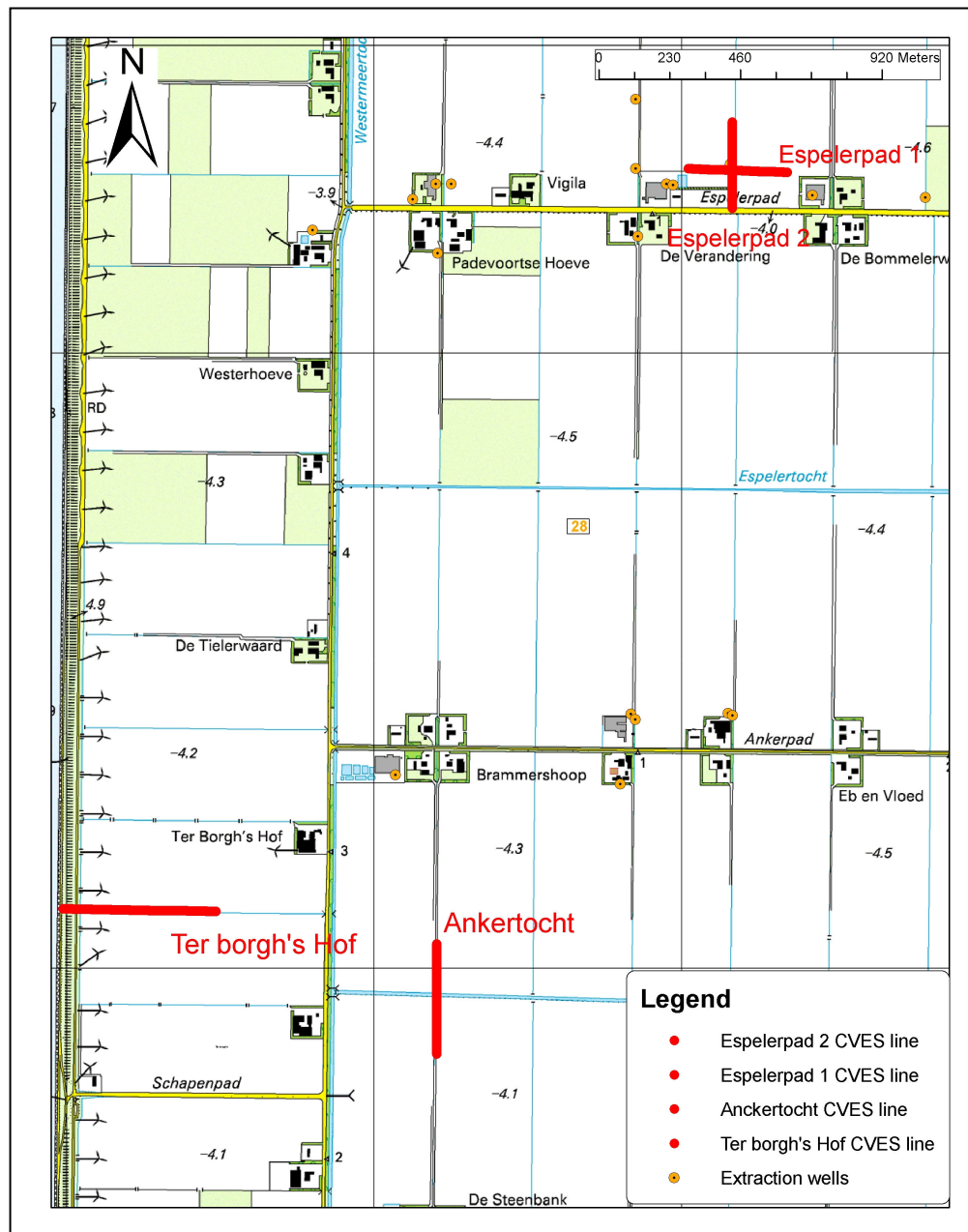
Figuur 44: Empirische relatie tussen de elektrische weerstand en de chloride concentratie voor het watermonsters genomen in de putten in het studiegebied.

6.3.3.4 Meetlocaties

Er zijn op drie locaties geo-elektrische profielen bemeaten (Figuur 45):

- 1) Ter Borgh's Hof, dit is een meetlijn van ongeveer 450m lang die loodrecht op de Westermeerdijk staat. De dijk ligt langs het IJsselmeer. Deze meetlocatie is gekozen om te onderzoeken of er nabij de dijk invloed zichtbaar is van een relatief zoete kwelstroom vanuit IJsselmeer. De meetlocatie ligt iets zuidelijker dan oorspronkelijk gepland omdat hier, volgens de lokale landeigenaren, vooral sprake is van zout water in de ondergrond;

- 2) Ankertocht, dit is een meetlijn van ongeveer 340m lang die loodrecht op de Tocht staat. De locatie van de meetlijn is gekozen op basis van de resultaten van de geleidbaarheidsmetingen in het oppervlaktewater (zie paragraaf 6.3.2);
- 3) Espelerpad, dit zijn twee meetlijnen van ruim 300m lang die zo dicht mogelijk langs een verzilte put staan. De meetlijnen kruisen elkaar loodrecht.



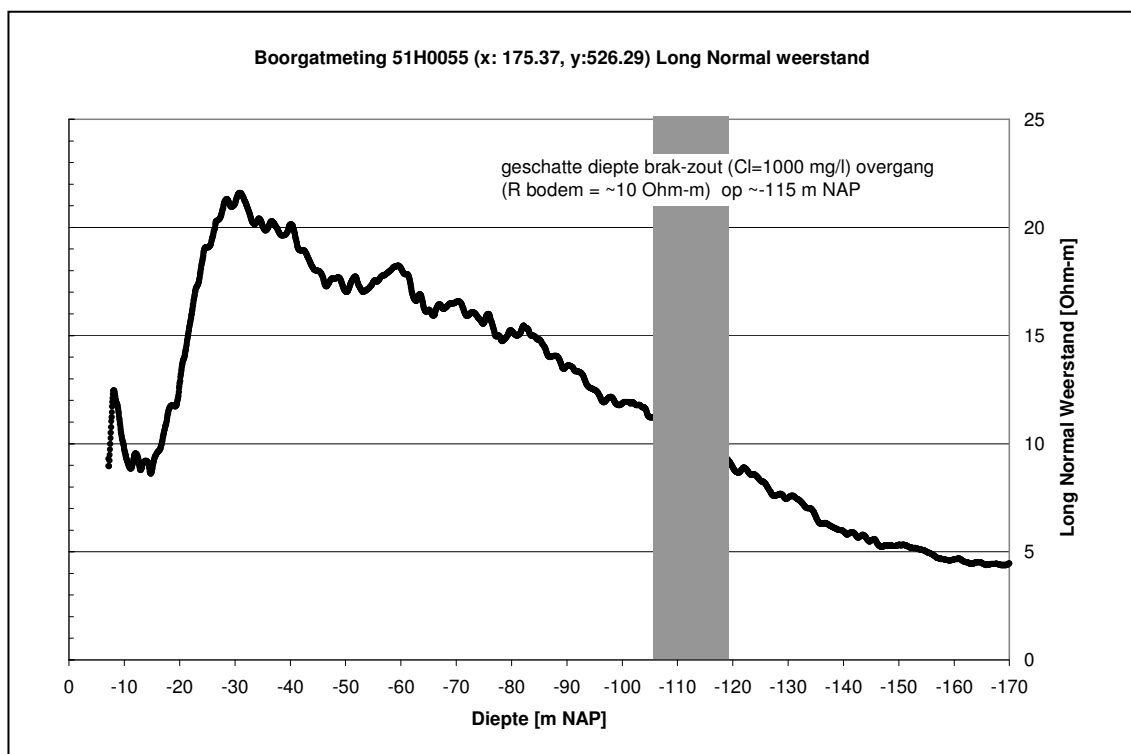
Figuur 45: Locaties van de geo-elektrische meetlijnen, Noordoostpolder, Flevoland.

6.3.3.5 Resultaat

De datakwaliteit van metingen is redelijk (Espelerpad) tot goed (Ter Borgh's Hof en Ankertocht). De eindresultaten van de metingen staan weergegeven in onderstaande figuren. In de figuren staan de werkelijke bodemweerstand tot -13m NAP zoals die op basis van de inversie zijn geschat (hierboven uitgelegd). De hogere elektrische weerstanden vanaf het maaiveld tot het grondwater zijn veroorzaakt door de drogere onverzadigde zone. Er zijn ook diepere meetwaarden beschikbaar (tot ~20 m-mv) maar die zijn niet weergegeven in de figuren omdat alle diepere meetwaarden duiden op zout water.

Boorgatmeting

Binnen een rechthoek van 5 km rondom de onttrekking bij Espelerpad (RD coördinaten 171-526.5) is gezocht in de DINO database van TNO naar boorgatmetingen waarin de geo-elektrische weerstand (Long Normal weersand = LN) is gemeten. Dit leverde één locatie op: 15H0055. De locatie ligt ongeveer 4 km landinwaarts (naar het oosten) ten opzichte van de putten langs het Espelerpad. In Figuur 46 ligt het geschatte brak-zout grensvlak (1000 mg/l) veel dieper dan in het studiegebied op ~-115m NAP.



Figuur 46: Geo-elektrische boorgatmeting 15H0055 (~4 km ten oosten van studiegebied).

Resultaat geo-elektrisch profiel Ter Borgh's Hof

Het geïnterpreteerde geo-elektrische profiel is weergegeven in Figuur 47. De diepte van het met behulp van CVES geschatte 2000 mg/l chloride grensvlak ligt op ongeveer -7m NAP. De geschatte dikte van de verzadigde zone met licht zout en brak grondwater is gezien het lage maaiveld (~-5.2m NAP) en de diepte van het grondwater (~1m-mv) dus hooguit 1 m. Op sommige plekken (bijvoorbeeld x=395m) is er helemaal geen zone met licht zout en brak water waargenomen (hier zou wel eens door een sterke dijkkwel relatief oud, reeds lang aanwezig, zout grondwater kunnen opwellen). De hogere weerstanden onder de dijk zijn zeer waarschijnlijk gerelateerd aan het dijklichaam zelf

door de aanwezigheid van stenen als dijkmateriaal. Het profiel laat dus geen duidelijke brakke kwel zien in de polder vlak naast de IJsselmeerdijk.

Resultaat geo-elektrisch profiel Ankertoht

Het geïnterpreteerde geo-elektrische profiel staat in Figuur 48. De diepte van het met behulp van CVES geschatte 2000 mg/l chloride grensvlak ligt voor het grootste deel van het profiel op ongeveer -6m NAP. De geschatte dikte van de verzadigde zone met licht zout en brak grondwater is gezien het lage maaiveld (~5m NAP) en de diepte van het grondwater (~1m-mv) dus hooguit 0.5m. Vanaf ongeveer 20m voor tot 60m na de Tocht ($x \approx 165\text{m}$) heeft is een zone met een lage elektrische weerstand tot aan maaiveld. Dit kan duiden op de aanwezig van zout water tot aan maaiveld, zoute kwel dus! (of eventueel zeer kleiig sediment).

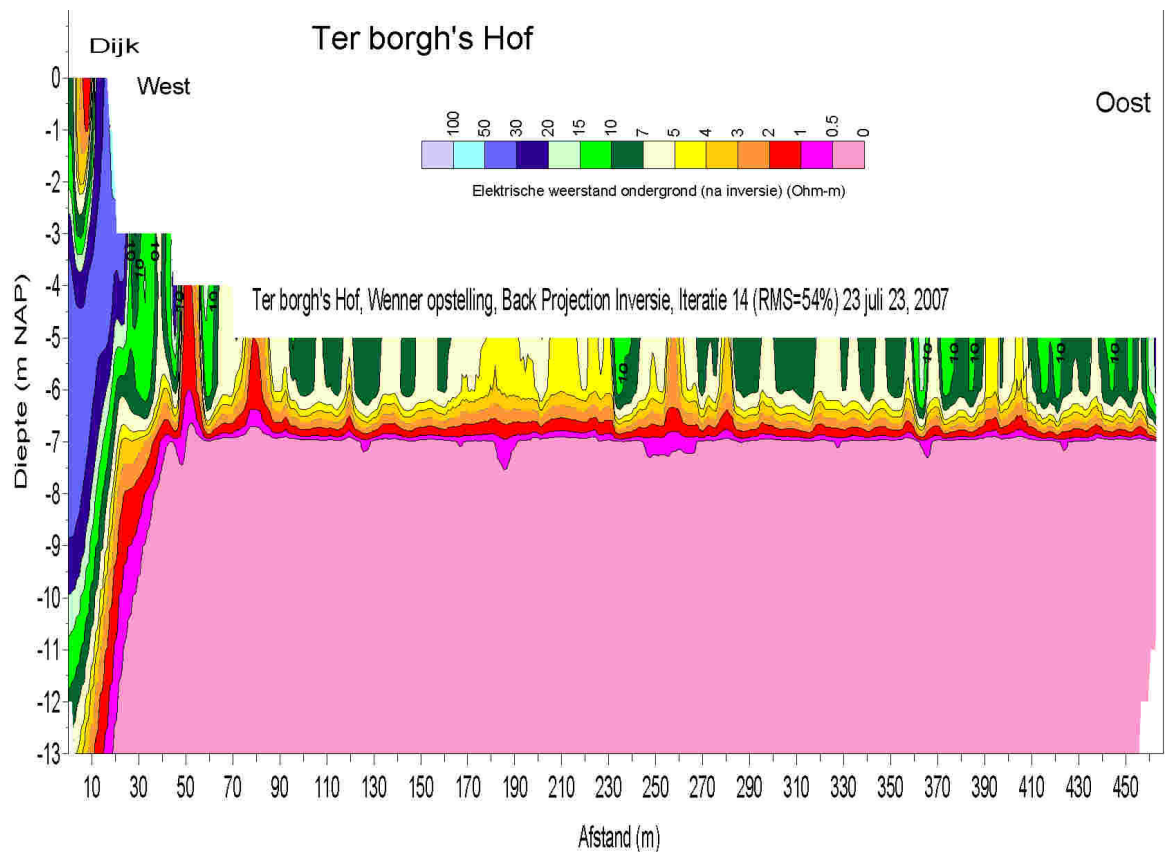
Resultaat geo-elektrisch profielen Espelerpad

De geïnterpreteerde geo-elektrische profielen staan in

Figuur 49. De diepte van het geschatte 2000 mg/l chloride grensvlak ligt voor het grootste deel van beide profielen tussen -7 en -12m NAP. De geschatte dikte van de verzadigde zone met licht zout en brak grondwater is gezien het lage maaiveld (~5m NAP) en de diepte van het grondwater (~1m-mv) dus ongeveer 5m. Op twee plekken is de zone met licht zout en brak grondwater het dikst (Espelerpad 1: $x \approx 200\text{m}$ en Espelerpad 2: $x \approx 275$). Nabij de put is, volgens de geo-elektrische profielen, het grondwater ongeveer net zo brak tot zout als in de omgeving. Volgens de monsternamen wordt uit de put met een diepte van 35m -mv (op een onbekende filterdiepte) grondwater onttrokken met een chloride concentratie van 900 mg Cl⁻/l (juli 2007). Dit is een veel lager chloride concentratie dan geschat op basis van het geo-elektrische profiel. Naast het feit dat onbekend is op welke diepte exact grondwater wordt onttrokken met als gevolg dat dus ook zoet tot licht brak grondwater uit het bovenste deel van het watervoerend pakket kan worden onttrokken zijn de mogelijk oorzaken hiervoor:

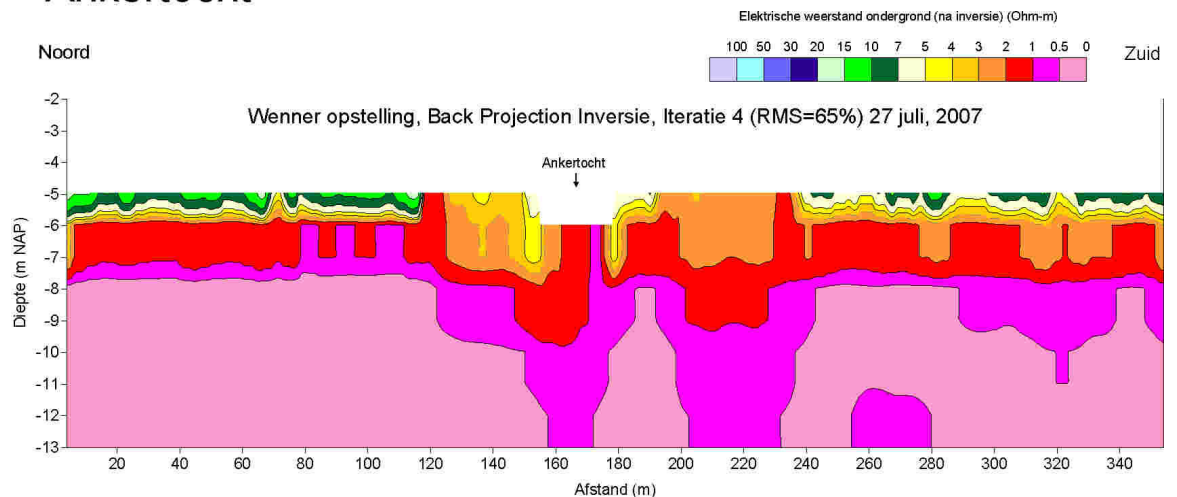
- a) de chloride concentratie in de put was lager tijdens de monsternamen dan tijdens de CVES meting (zomer 2007);
- b) de bodem is zeer kleiig waardoor er sprake is van een schijnbare formatie factor waardoor de chloride berekening niet goed meer opgaat (zie hierboven);
- c) andere ionen in het grondwater spelen ook een relatief grote rol in de geleidbaarheid van het grondwater (de wateranalyses in het gebied duiden hier echter niet op);
- d) er is sprake van een inversie; de put onttrekt zijn water uit een zandlaag met brak/zoet water (hoge elektrische weerstand) die onder een laag met zoutwater (lage elektrische weerstand) ligt.

Verklaring (d) lijkt ons het meest plausibel omdat er ook inversies in het gebied zijn waargenomen op een aantal locaties op basis van analyses (zie de locaties 15H8028, 20EE8002 en 20FE8015 in Bijlage **Error! Reference source not found.**). Het is voor geo-elektriek lastig om een hogere (zoete) weerstandslaag te detecteren die onder een laag zit met een veel lagere (zoute) elektrische weerstand; de elektrische stroom blijft grotendeels in de lage weerstandslaag. Om dit nader te onderzoeken zou er een elektromagnetische boorgatmeting kunnen worden uitgevoerd in de put als hij van PVC is. Een andere mogelijkheid is het in detail interpreteren van een geo-elektrisch meting (veldwerk of uit DINO database) met een hele grote elektrodeafstand. Met deze meting kan dan dieper de grond in worden gekeken.

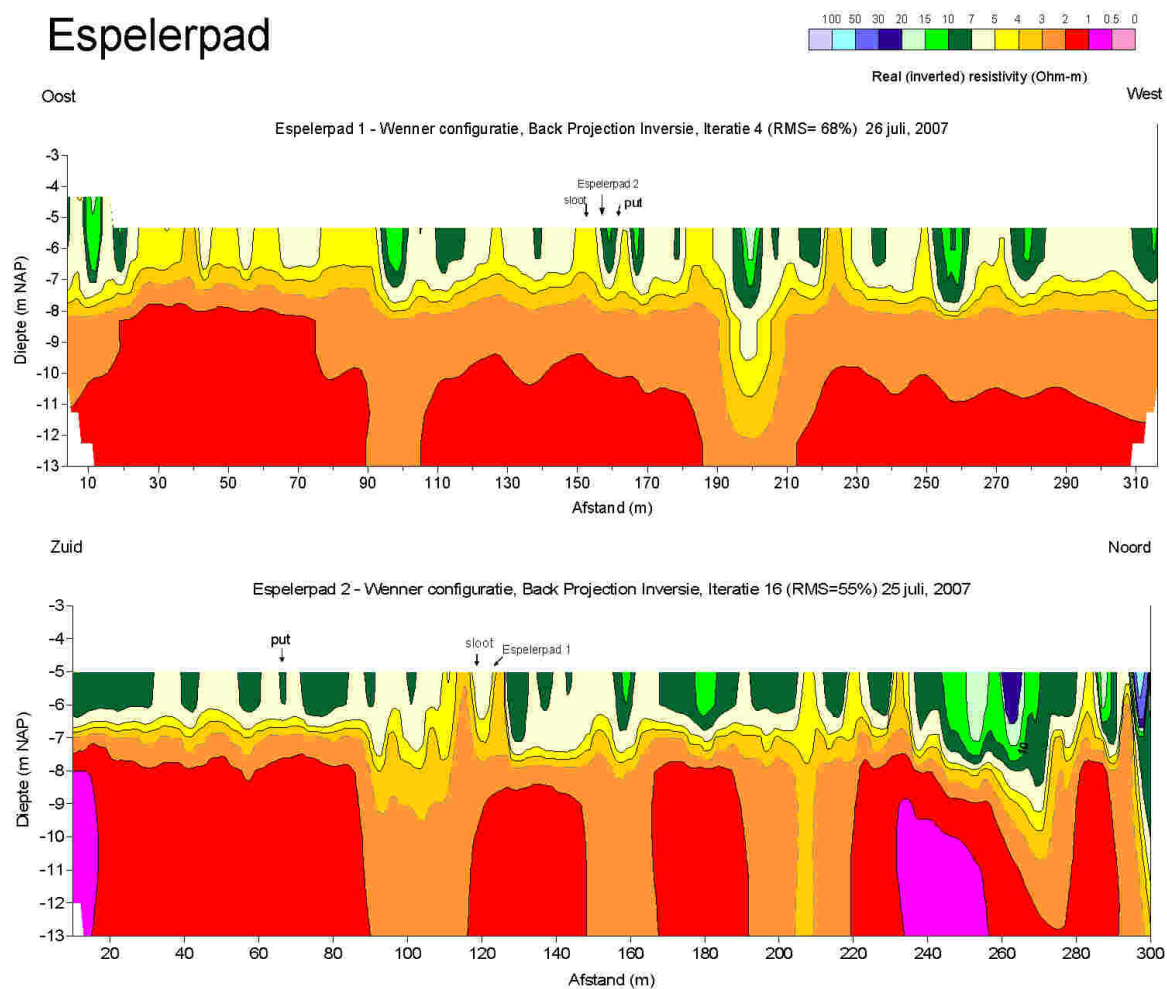


Figuur 47: Resultaat van de geo-elektrische meting nabij Ter Borgh's Hof (de lijn van 3 Ohm-m is geschatte diepte brak-zout grensvlak).

Ankertocht



Figuur 48: Resultaat van de geo-elektrische meting Ankertocht (de lijn 3 van Ohm-m is geschatte diepte brak-zout grensvlak).



Figuur 49: Resultaat van de geo-elektrische meting Espelerpad 1 en 2, over de grondwateronttrekkingsput.

6.4 Conclusies

Uit de meetcampagne in het detailgebied rondom Espel, Noordoostpolder, komt naar voren dat de verspreiding van zoet en zout grondwater overeenkomt met de 3D zoet-zout kartering, zoals beschreven in hoofdstuk 5. Over het algemeen is in dit gebied een homogeen zoet-brak-zout patroon te zien; de chloride concentraties in het oppervlaktewater zijn licht tot zeer brak. Hieronder worden in het kort enkele conclusies aan de hand van de deelvragen opgenoemd:

- *Hoe is de verspreiding van zoet en zout grondwater in detail?*
Zoet, brak en zout grondwater lijkt in het bemeten gebied overeen te komen met de 3D zoet-zout kartering. Over het algemeen is in dit gebied een homogeen zoet-brak-zout patroon te zien. CVES metingen in vier profielen wijzen echter uit dat het brak-zout grensvlak van 2000 mg Cl⁻/l ondiep in het studiegebied ligt. Deze inschatting wijkt af van de metingen in de onttrekkingsputten, en kan waarschijnlijk verklaard worden door de aanwezigheid van een inversie van zout-zoet grondwater. Het grondwater in de twee profielen over het Espelerpad zijn zoeter dan in de twee andere profielen; die komt overeen met de kartering (zie voor een ondiepe uitsnede Figuur 42).
- *Verzoet het grondwater door de kwelstroom vanuit het IJsselmeer?*
Er is vooralsnog geen bewijs dat het grondwater door de kwelstroom vanuit het IJsselmeer verzoet. Het lijkt er zelfs op dat dieper gelegen brak tot zout grondwater door de dijkkwelstroom versneld naar het oppervlak wordt 'gedrukt'. Als op de hele lange termijn van tientallen tot honderden jaren zal de verzoeting significant zijn.
- *Wat is de invloed van de tochten in het gebied? Trekt dit zout grondwater van grotere diepte aan?*
De CVES meting (Figuur 48) lijkt erop te wijzen dat de bemeten Ankertoicht dieper brak tot zout grondwater aantrekt. T-EC metingen suggereren bovendien een temperatuurgradiënt die veroorzaakt zou kunnen worden door een kwelstroming (met brak tot zout) grondwater vanuit de diepere ondergrond.
- *Wat gebeurt er in de buurt van grondwateronttrekkingen? Welke factoren bepalen of zout grondwater in een put komt en hoe lang duurt dit dan?*
De chloride concentraties ter plaatse van de onttrekkingen zijn relatief hoog, voor het grootste deel ruim boven de 1000 mg Cl⁻/l. Het is aannemelijk dat het een mengsel betreft van ietwat dieper brak/zout grondwater en ondiep relatief zoet grondwater. Onderin de putten zal de concentratie gemiddeld nog wat hoger liggen. Met name de huidige brak-zout verdeling bepaalt in de analytische benadering of zout in de put komt. Volgens de analytische berekeningen komt het brak-zout grensvlak in de meeste gevallen binnen enkele jaren omhoog. Over de snelheid van opkegeling van brak tot zout grondwater valt verder met deze manier van analytische aanpak weinig zinnigs te zeggen.
- *Wat is de invloed van de eigenschappen van de ondergrond (verspreiding klei, zand en veen) op verzoeting en verzilting?*

Aan de hand van de DINO database (waarin de kartering van de bovenkant en onderkant van alle zand-, klei- en veenlagen is vastgelegd) blijkt dat in het studiegebied in de bovenste tientallen meters nauwelijks klei en veen voorkomt, waardoor hierover geen uitspraken kunnen worden gedaan

7 Numerieke modellering 3D zoet-zout grondwater

7.1 Inleiding

Aanleiding en doelstelling

Om de ontwikkeling van het onttrekkingsregime voor de komende decennia te kunnen schatten, en om de verschuiving van het grensvlak te kunnen bepalen is gebruik gemaakt van een 3D numerieke modellering van zoet, brak en zout grondwater. Door deze computerberekeningen kunnen grondwaterstromingspatronen, verzoeting en verzilting beter worden begrepen. Er is getracht een modelschematisatie te kiezen die representatief is voor een groot gebied in de provincie. De opgedane kennis uit de proefuitwerking wordt zoveel mogelijk gebruikt om algemene uitspraken te kunnen doen voor de gehele provincie. Zodoende kan de kaart met kansen en risico's voor grondwaterexploitatie worden verbeterd.

Aanpak

Na het bestuderen van de analytisch aanpak (paragrafen 7.2 en 7.3) is er een numeriek model geconstrueerd van een 3D lokaal zoet-zout grondwatersysteem, ter grootte van de invloedssfeer van één (grote) agrarische onttrekking. Met het model wordt inzichtelijk gemaakt wat het effect is van grondwateronttrekkingen op de zoet-zout verdeling, de stijghoogte (incl. grondwaterstand), de kwel-infiltratie situatie en zoutbelasting naar het oppervlaktewater.

Vervolgens zijn verschillende typen modelscenario's gekozen, zodanig dat de effecten van de geologie (positie weerstandslagen), het onttrekkingsregime (kort veel versus weinig lang), de onttrekkingsdiepte en de initiële chloride concentratie op de verzilting van de ondergrond bekeken kunnen worden. Daarnaast zijn modellen gemaakt die de effecten op de verzilting van de grond kunnen bepalen van interfererende debieten, waarbij gedacht moet worden aan een cluster van boeren, en warmte-koude opslag. Tot slot zijn de modelberekeningen geëvalueerd om te bepalen of het nodig is om meer in kennisontwikkeling te investeren en in welke richting gedacht moet worden (meer metingen, ontwikkeling zoet-zout modelinstrumentarium, etc.). Hierbij is geëvalueerd of andere kennisvragen bij dit zoet-zout onderzoek betrokken moeten worden (denk aan klimaatveranderingsscenario's in verband met WB21 en peilbeheer IJsselmeer).

Afbakening

Deltares heeft de modelleercode MOCDENS3D tot zijn beschikking om de effecten op de verzilting van de ondergrond te kunnen berekenen (Bijlage G). De chloride concentraties van het grondwater binnen de grenzen van de Provincie Flevoland zijn dusdanig hoog dat deze significante ruimtelijke dichtheidsverschillen van het grondwater veroorzaken. Om de grondwaterstroming juist te simuleren dient rekening te worden gehouden met deze dichtheidsverschillen. De softwarecode MOCDENS3D (Oude Essink, 1998; 2001) is een samenvoeging van state-of-the-art software op het gebied van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en dispersief en advectief transport van brak en zout grondwater.

Er is gekozen voor een gebied van 2.5 km x 2.5 km x 270m. In het horizontale vlak wordt dit gebied verdeeld in cellen van 25 x 25m²; er zijn in het horizontale vlak dus 100*100 cellen aanwezig. In de verticale richting wordt het gebied verdeeld in 61 lagen variërend met een dikte van 2 tot 5m. Aan de randen van het model geldt een hydrostatische drukverdeling die gecorrigeerd is voor dichtheidsverschillen. Er zal

gerekend worden gedurende een periode van 10 tot 30 jaar, afhankelijk van het scenario.

7.2 Analytisch model: stijghoogteverlaging door grondwateronttrekkingen

Er is bij de bepaling van de gesommeerde stijghoogteverlaging in het watervoerend pakket door grondwateronttrekkingen uitgegaan van de Formule van De Glee. Deze analytische vergelijking geldt voor de stationaire situatie van een gedeeltelijk afgesloten (*semi-confined*) grondwater systeem, met een onveranderd freatisch vlak. De vergelijkingen zijn als volgt (zie bijv. van Dam, 1988; Kruseman en de Ridder, 1970):

$$\phi = \frac{Q_0}{2\pi k D} K_0 \left(\frac{r}{\lambda} \right)$$

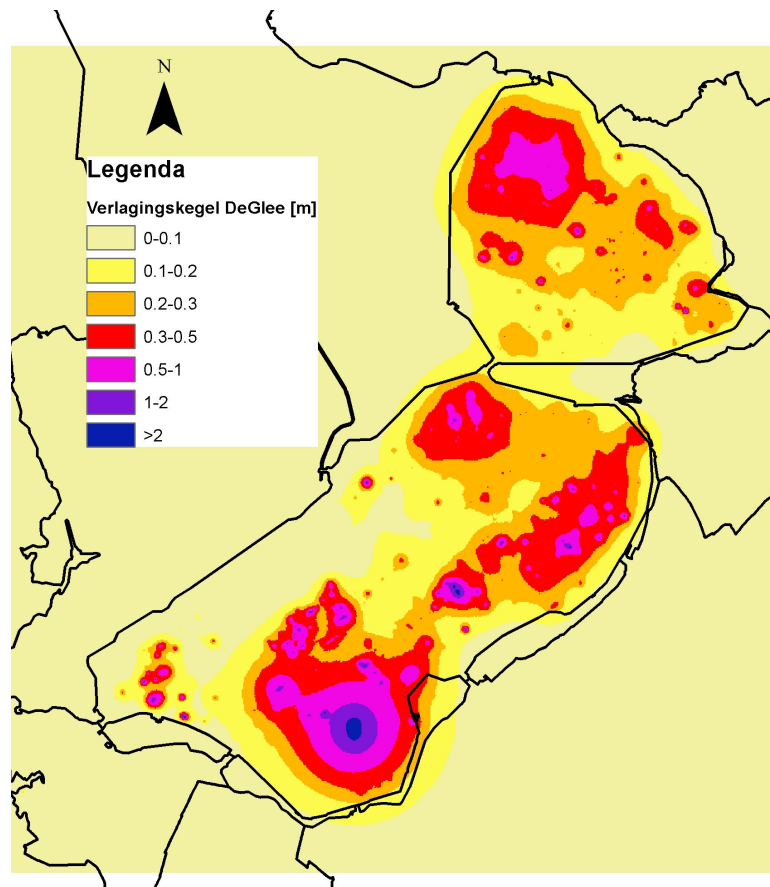
$$\lambda = \sqrt{k D c}$$

waar:

- ϕ = de verlaging van de stijghoogte op de locatie r (L);
- Q_0 = onttrekkingsdebiet van de put ($L^3 T^{-1}$);
- r = straal, afstand tussen de onttrekking en de locatie waar de stijghoogte berekend is (L);
- D = dikte watervoerend pakket (L);
- k = horizontale hydraulische conductiviteit ($L T^{-1}$);
- λ = spreidingslengte (L);
- c = de hydraulische weerstand van de deklaag, gelegen boven het watervoerend pakket (T);
- K_0 = Bessel functie K_0 .

Voor elke put kan op een afstand r de verlaging worden uitgerekend. Uit REGIS is voor elke locatie de dikte en de horizontale hydraulische conductiviteit van het watervoerend pakket genomen waar de put in ligt; de bovenliggende deklaag is tevens onttrokken uit REGIS. Daarnaast zijn uit het Grondwaterregister in samenspraak met de Provincie voor elke type onttrekking (als bijv. industrie, landbouw, overig) de representatieve debieten gecreëerd. In een grid van 100 bij 100m over de gehele provincie kan voor elke gridcel de afstand worden uitgerekend tot iedere afzonderlijke put, en zodoende ook de verlaging. In elke gridcel worden de verlagingen van alle onttrekkingsputten gesommeerd. Er dient niet te worden vergeten dat met deze analytische vergelijkingen slechts een schatting wordt gemaakt van de stijghoogteverlaging. Voor een meer nauwkeurige berekening zou serieus overwogen moeten worden gebruik te maken van een volledig 3D numeriek grondwaterstromingsmodel. In dit model kunnen dan relatief eenvoudig de relevante geologische lagen en de grondwateronttrekkingen worden ingevoerd.

Figuur 50 toont de stijghoogteverlaging verlaging in de Provincie Flevoland: met name in Zuidelijk Flevoland is de verlaging door de grote onttrekkingen aldaar significant.

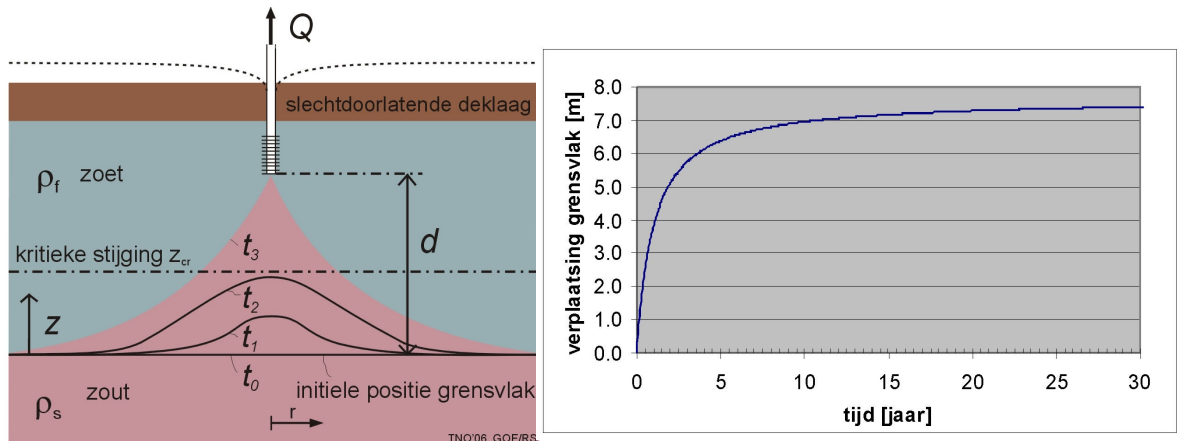


Figuur 50: Gesommeerde verlaging veroorzaakt door alle grondwateronttrekkingen in het watervoerend pakket.

7.3 Analytisch model: opkegelen van het zoet-zout grensvlak

Het principe van de verplaatsing van het zoet-zout grensvlak als gevolg van putonttrekking (opkegeling) is geïllustreerd in Figuur 51. Hierin is te zien dat als gevolg van onttrekking van grondwater het grensvlak rond de positie van de put geleidelijk aan omhoog komt in de loop der tijd. Het figuur toont dat onder andere het debiet van de putonttrekking, de diepte van de filter en de diepte van het grensvlak bepalend zijn voor de mate van opkegeling. De verdeling in de diepte van de onttrekkingsputten is weergegeven in Figuur 53a. Hieruit blijkt dat bij de meerderheid (bijna 80%) van de onttrekkingsputten de filter zich op een diepte van maximaal 40 m bevindt. De pompcapaciteit van de onttrekkingsputten is te zien in Figuur 53b. Hieruit blijkt dat de pompcapaciteit bij de meesten putten gering is. Bij 60% van de putten is de pompcapaciteit lager dan 25 m³/uur en bij 95% is dit minder dan 100 m³/uur. Alleen in zuidelijk Flevoland en het oostelijk deel van de Noordoostpolder komen enkele (diepe) putten voor met een pompcapaciteit hoger dan 100 m³/uur.

Als eerste aanzet zal met behulp van een set analytische vergelijkingen worden geschat hoe snel en hoe veel het zoet-zout grensvlak omhoog schuift tengevolge van een grondwateronttrekking, zie Figuur 51 (Bear & Dagan, 1964; Dagan & Bear, 1968; Schmorak & Mercado, 1969). Bijbehorende analytische vergelijkingen zijn als volgt:



Figuur 51: Voorbeeld van een conceptueel model waarmee het opkegelen van zout grondwater ('omhoog stromen van zout grondwater naar locaties van grondwateronttrekkingen') onder een onttrekking wordt berekend, b. verplaatsing van zoet-zout grensvlak onder een grondwateronttrekking als een functie van de tijd.

$$z(r, t) = \frac{Q_0}{2\pi\alpha k_x d} \left[\frac{1}{(1 + R'^2)^{1/2}} - \frac{1}{[(1 + \gamma'^2) + R'^2]^{1/2}} \right]$$

$$R' = \frac{r}{d} \frac{k_z}{k_x}^{1/2} \quad \gamma' = \frac{\alpha k_z}{2n_e d} t$$

waar:

- $z(r, t)$ = de verplaatsing van het grensvlak boven z'n initiële positie, op de locatie r en op tijdstip t (L);
- Q_0 = onttrekkingsdebiet van de put ($L^3 T^{-1}$);
- r = afstand tussen de onttrekking en de locatie waar de verplaatsing berekend is (L);
- t = tijd verlopen na het begin van de onttrekking (T);
- $\alpha = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ = het relatieve dichtheidsverschil (-);
- d = afstand tussen put en initiële positie van zoet-zout grensvlak op tijdstip $t=0$ (L);
- k_x = horizontale hydraulische conductiviteit ($L T^{-1}$);
- k_z = verticale hydraulische conductiviteit ($L T^{-1}$);
- n_e = effectieve porositeit (-).

Het opkegelen van het zoet-zout grensvlak direct onder de grondwateronttrekkingsput (dus op $r=0$) is gelijk aan (zie Oude Essink, 2001):

$$z(0, t) = \frac{Q_0}{2\pi\alpha k_x d} \left[1 - \frac{1}{1 + \gamma'} \right]$$

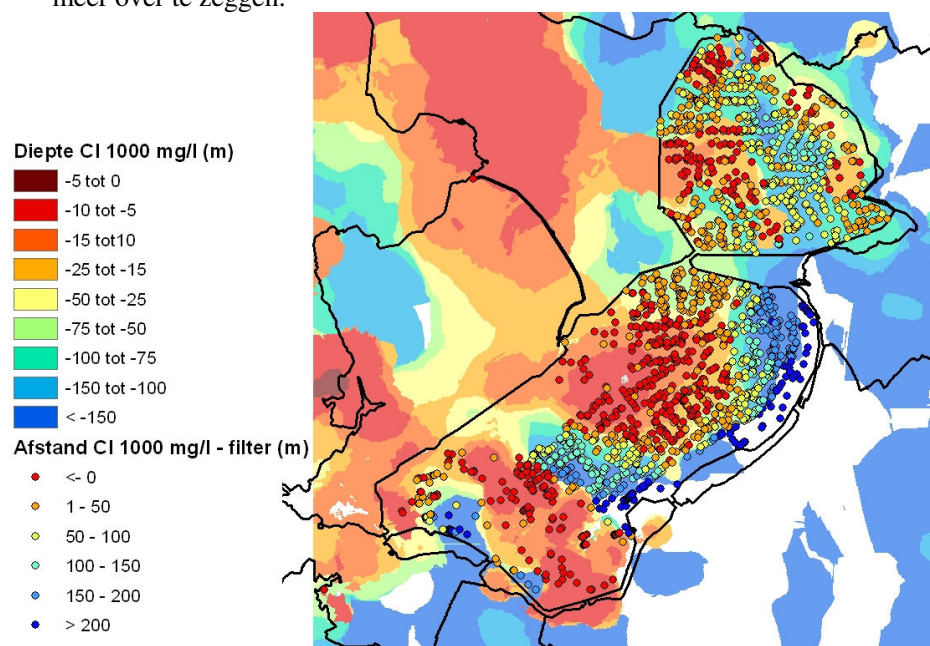
De uiteindelijke positie (dus op t is oneindig) van het zoet-zout grensvlak en ter plaatse van de put op $r=0$ (waar de verplaatsing maximaal zal zijn) is als volgt:

$$z(0, t \rightarrow \infty) = \frac{Q_0}{2\pi\alpha k_x d}$$

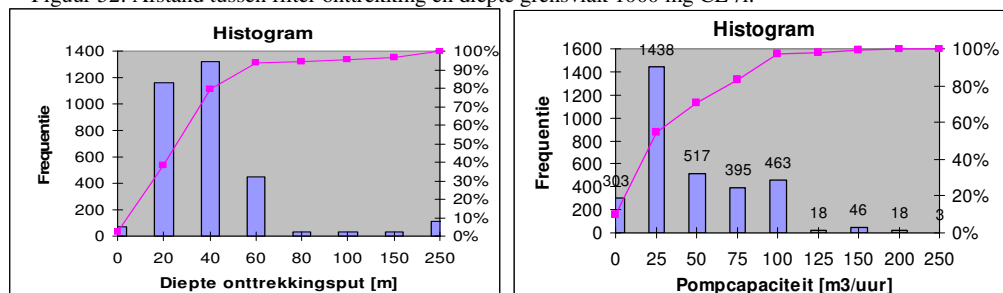
Met andere woorden: de verplaatsing van het zoet-zout grensvlak is evenredig met het onttrekkingsdebiet, en omgekeerd evenredig met de horizontale hydraulische conductiviteit én de afstand tussen de put en de initiële positie van het zoet-zout

grensvlak. Hoe groter de afstand, hoe kleiner de verplaatsing; hoe groter de horizontale hydraulische conductiviteit, hoe kleiner de verplaatsing. De positie van dit initiële zoet-zout grensvlak d is gebaseerd op de locatie van het 1000 mg Cl-/l grensvlak (Figuur 52) dat een gemiddelde is voor het gebied rondom de specifieke onttrekking. Er is ook te zien dat deze afstanden goed overeenkomen met de verdeling in diepte van het grensvlak. Ook valt op dat bij een groot deel van de onttrekkingsputten de filter zich dieper dan het grensvlak bevindt, wat indiceert dat er zout water wordt opgepompt. Bij de oostelijke rand van Flevoland (bij de randmeren) is de afstand tussen het grensvlak en filter het grootst (>200 m) doordat het grensvlak zich hier op grote diepte bevindt. Aangezien de verplaatsing van het grensvlak lokaal zal zijn, kan deze eerste benadering genomen worden. Voor de afstand van de putscherm en het initiële grensvlak is gebruik gemaakt van het Grondwaterregister (Figuur 50 en Figuur 51).

Met de analytische vergelijkingen is dus op grove wijze aan te geven welke grondwateronttrekkingen in de Provincie Flevoland mogelijk zouden verzilten. Er is hier uitgegaan van de volgende eigenschappen: er is sprake van een grensvlak tussen zoet en zout grondwater, er bevinden zich geen slechtdoorlatende weerstandslagen tussen het scherm van de onttrekking en het zoet-zout grensvlak (alleen Figuur 54h en i zijn geldig), en het onttrekkingsdebiet is constant. Duidelijk moet zijn dat de werkelijkheid vaak complexer is. Met behulp van de numerieke modellering is hier meer over te zeggen.

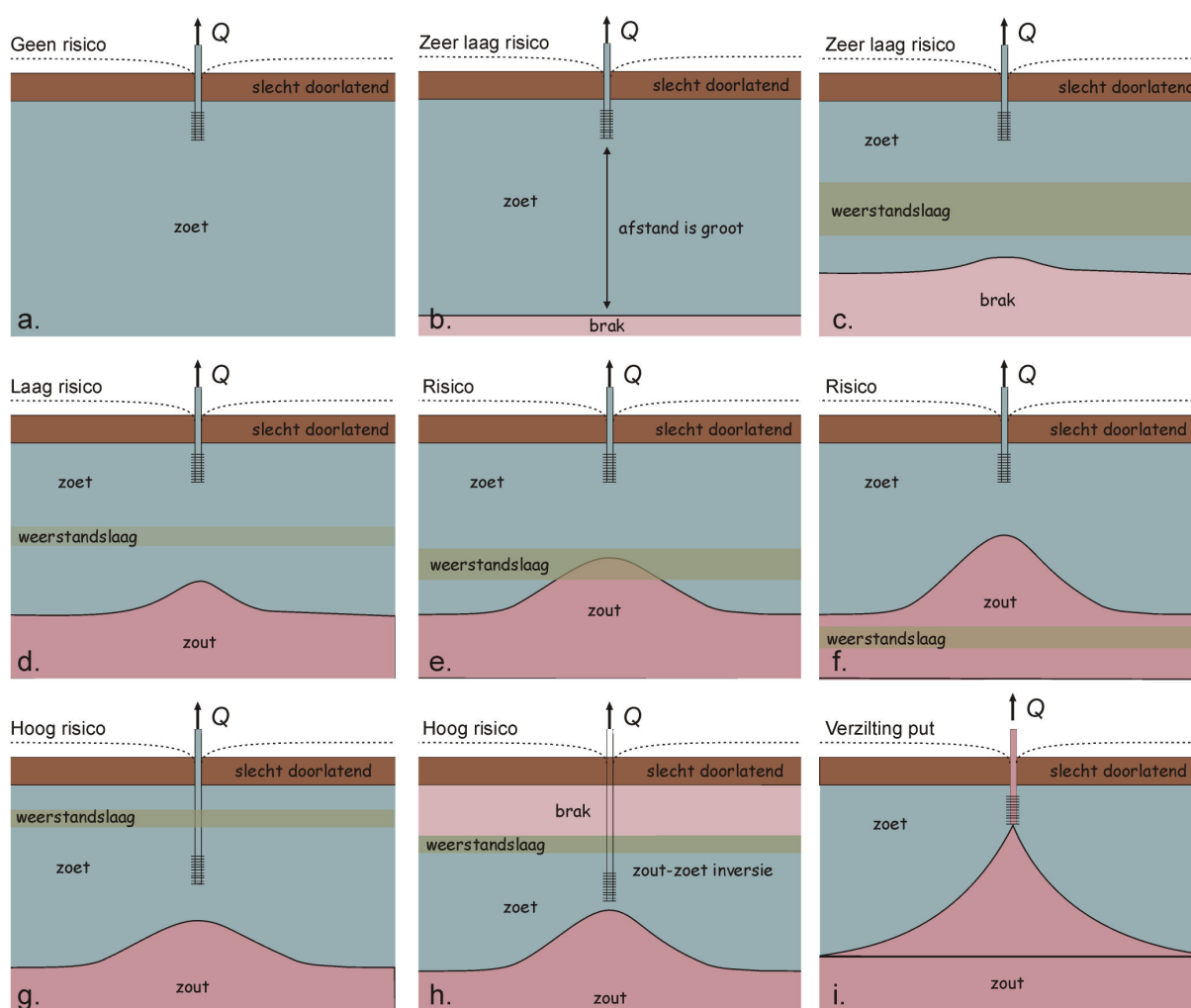


Figuur 52: Afstand tussen filter onttrekking en diepte grensvlak 1000 mg CL-/l.

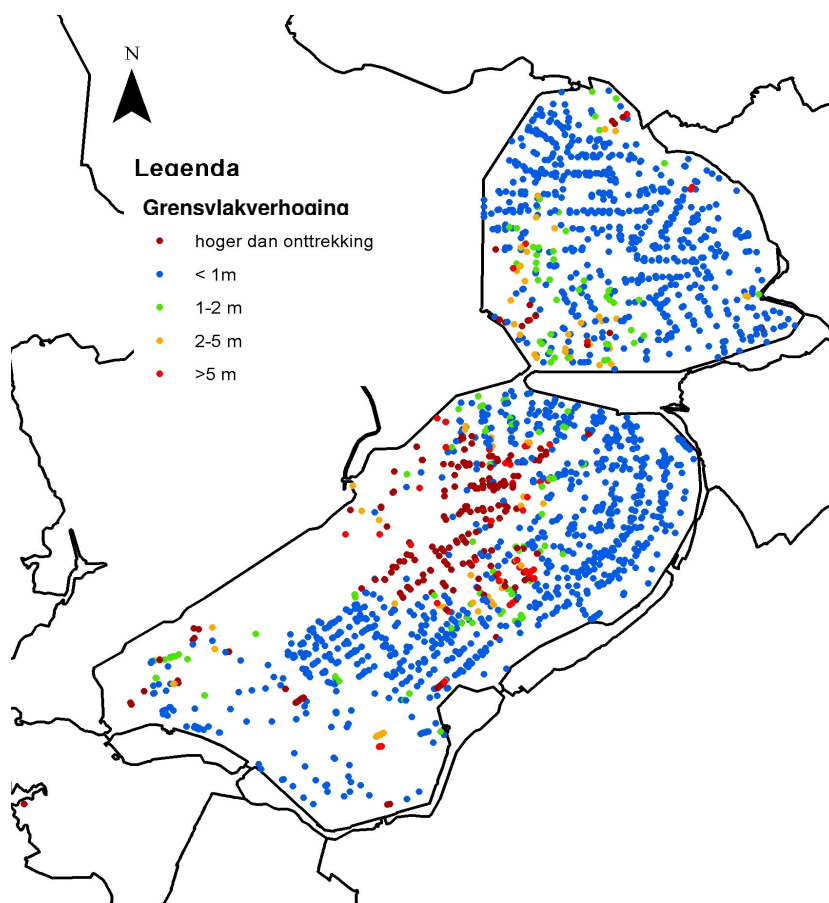


Figuur 53: Diepte van de bovenkant filter van de onttrekkingsput (m -mv) (bron: Grondwaterregister, Provincie Flevoland).

Figuur 55 toont de maximale verplaatsing van het initiële zoet-zout grensvlak ter plaatse van de onttrekkingsputten in de Provincie Flevoland. In een groot gedeelte van het studiegebied is de verhoging klein (in de figuur valt dit onder het interval van kleiner dan 1m, ' $< 1\text{m}$ '). Dit betekent dat op deze locaties niet of nauwelijks gevaar dreigt voor verzilting met zout grondwater. Dit komt doordat óf het grensvlak erg diep ligt, óf omdat de grondwateronttrekkingen klein zijn. Hier en daar (oranje en rood-oranje bolletjes in Figuur 55) wordt wel een verhoging van het grensvlak berekend: dit komt waarschijnlijk door de grote onttrekkingsdebieten. Op een aantal locaties ligt het berekende brak-zout grensvlak (1000 mg Cl-l/l), zie Figuur 52, nu al hoger dan de onttrekkingsput (zo ook in het zuiden van het veldstudiegebied rondom Espel). In noordelijk Flevoland, tussen de steden Lelystad, Dronten en Biddinghuizen, lijkt een kwetsbaar gebied te zijn. Dit zal te wijten zijn aan de ondiepe positie van het brak-zout grensvlak.



Figuur 54: Mogelijke onttrekkingssituaties in het studiegebied van de Provincie Flevoland.



Figuur 55: Verhoging van het zoet-zout grensvlak aan de hand van de analytische vergelijkingen.

7.4 Beschrijving numeriek model

7.4.1 Beschrijving scenario's

7.4.1.1 Inleiding

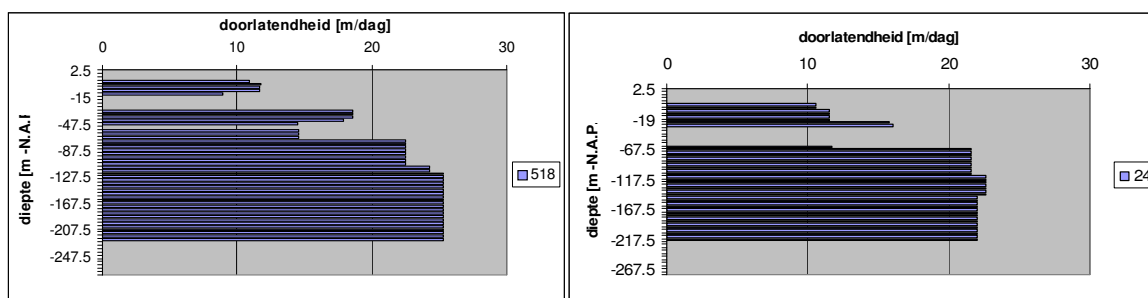
Na het bestuderen van de geologische en hydrologische gegevens van het gebied zijn de in dit document beschreven scenario's ontstaan voor het modelleren van onttrekkingen in het zoet-brak-zout grondwatersysteem van de Provincie Flevoland.

De numerieke modellen simuleren de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater in de ondergrond als gevolg van grondwateronttrekkingen in verschillende geologische systemen, met verschillende initiële zoet-zout verdelingen en bij verschillende onttrekkingsdebieten. Er zijn 5 typen bronnen/onttrekkingen met verschillende pompregimes gedefinieerd, 3 typen initiële chloride concentratie verdeling en 3 typen geologische opbouw. Dit resulteert in $5 \times 3 \times 3 = 45$ scenario's die allemaal zijn gemodelleerd en waarvan in elk geval de meest relevante zullen worden getoond. Doel is een idee te krijgen onder welke geo(hydro)logische en onttrekkingsomstandigheden opkegeling van brak tot zout grondwater optreedt. Zoals bekend is reeds in een eerder stadium van het project met analytische vergelijkingen gewerkt (paragraaf 7.3), maar de daarin aanwezige aannames/beperkingen (op het

gebied van positionering weerstandslagen, onttrekkingsregime en zoet-zout verdeling) rechtvaardigen dit uitgebreide numerieke modelonderzoek.

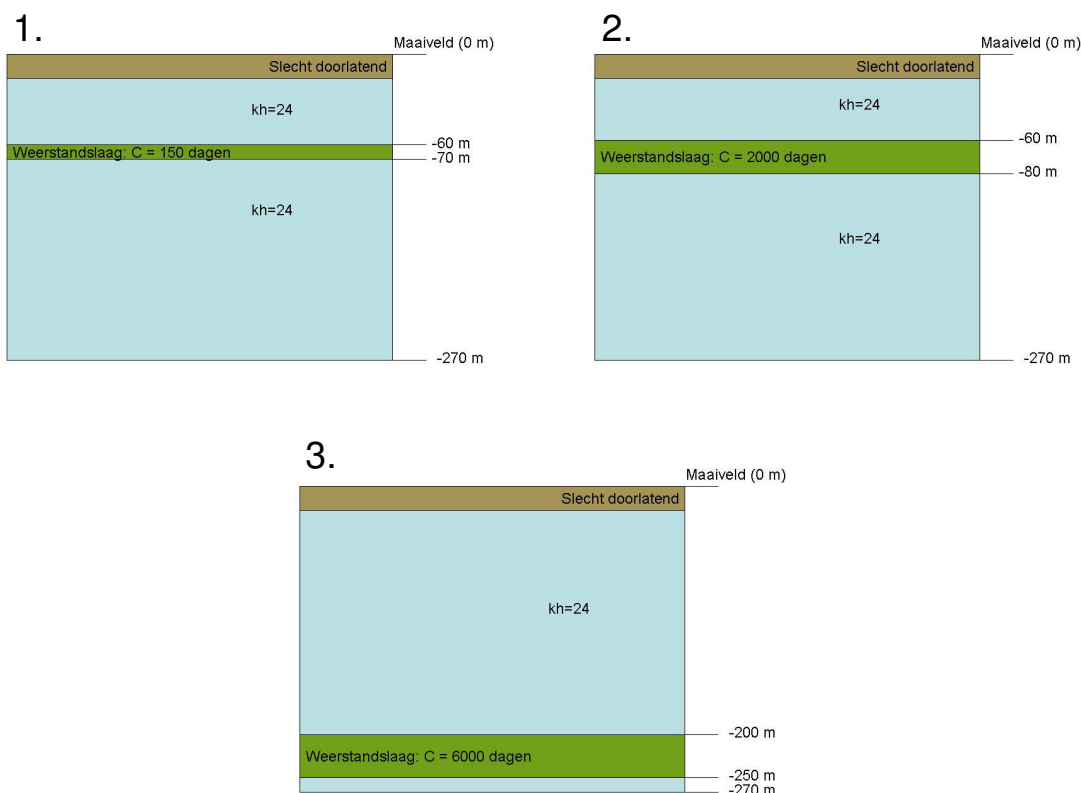
7.4.1.2 Typen geologie

REGIS (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem) geeft inzicht in de 3D verdeling van de geologie van Nederland. De geohydrologische opbouw met zijn bijbehorende parameters vormen een belangrijk onderdeel bij het bepalen van kwetsbare, risico gebieden en de draagkracht van het systeem. Voor elke onttrekking was het met behulp van deze kartering mogelijk om het geologische profiel te bepalen op de locatie van de onttrekking. Voor alle onttrekkingen in de Provincie Flevoland is dit geologische profiel met bijbehorende parameters (kD, weerstand) bepaald en hieruit zijn 3 typen geologie geabstraheerd. In Figuur 56 zijn twee voorbeelden van profielen te vinden van de doorlatendheid op de locatie van de putten.



Figuur 56: Twee voorbeelden van doorlatendheidsprofielen (hydraulische conductiviteit) op de locatie van de onttrekking (figuur a is putnummer 518 met x-coördinaat 165820 en y-coördinaat 486810; figuur b is putnummer 24 met x-coördinaat 142800 en y-coördinaat 484250.).

De volgende 3 typen geologie zijn gedefinieerd, gebaseerd op de gegevens van de ondergrond (let op dat deze typen representatief zijn voor Flevoland en dus niet precies overeenkomen met bovenstaande figuur):



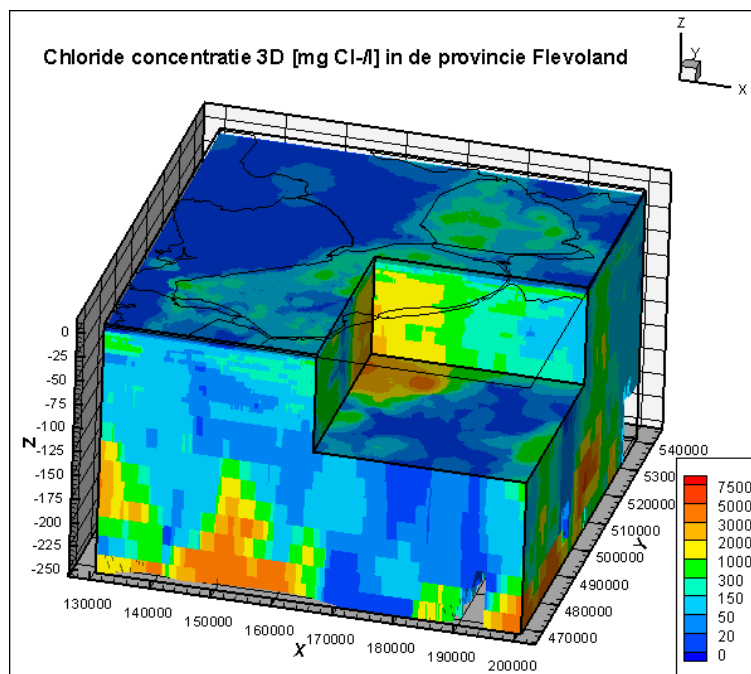
7.4.1.3 Typen onttrekking

In samenspraak met de Provincie Flevoland is gekozen voor een vijftal typen bronnen/onttrekkingen:

1. **Type Beregening ondiep:** Onttrekking van 30 tot 60 meter onder maaiveld met een debiet van 80 m³/uur. Er wordt elk jaar van april tot september 17 maal 9 uur onttrokken met tussenperioden van 9 dagen en 15 uur;
2. **Type Beregening diep:** Onttrekking van 80 tot 110 meter onder maaiveld met een debiet van 80 m³/uur. Er wordt elk jaar van april tot september 17 maal 9 uur onttrokken met tussenperioden van 9 dagen en 15 uur;
3. **Type Beregening, Cluster boeren (ondiep):** 9 onttrekkingen van 30 tot 60 meter onder maaiveld met een debiet van 80 m³/uur per onttrekking. Er wordt elk jaar van april tot september 17 maal 9 uur onttrokken met tussenperioden van 9 dagen en 15 uur. De afstand tussen de onttrekkingen is 200 meter;
4. **Type Bronbemaling diep:** 2 onttrekkingen van 10 to 40 meter onder maaiveld met een debiet van 150 m³/uur gedurende 14 dagen. Eenmalige onttrekking in het eerste jaar. De afstand tussen de 2 onttrekkingen is 25 meter;
5. **Type WKO (Warmte Koude Opslag) (diep):** 2 onttrekkingen van 80 tot 110 meter onder maaiveld met een debiet van 70 m³/uur in de maanden oktober tot en met april en een debiet van 110 m³/uur in de maanden mei tot en met september. Het dagregime van deze putten is 8 uur aan, 16 uur uit. De afstand tussen de putten is 125 meter.

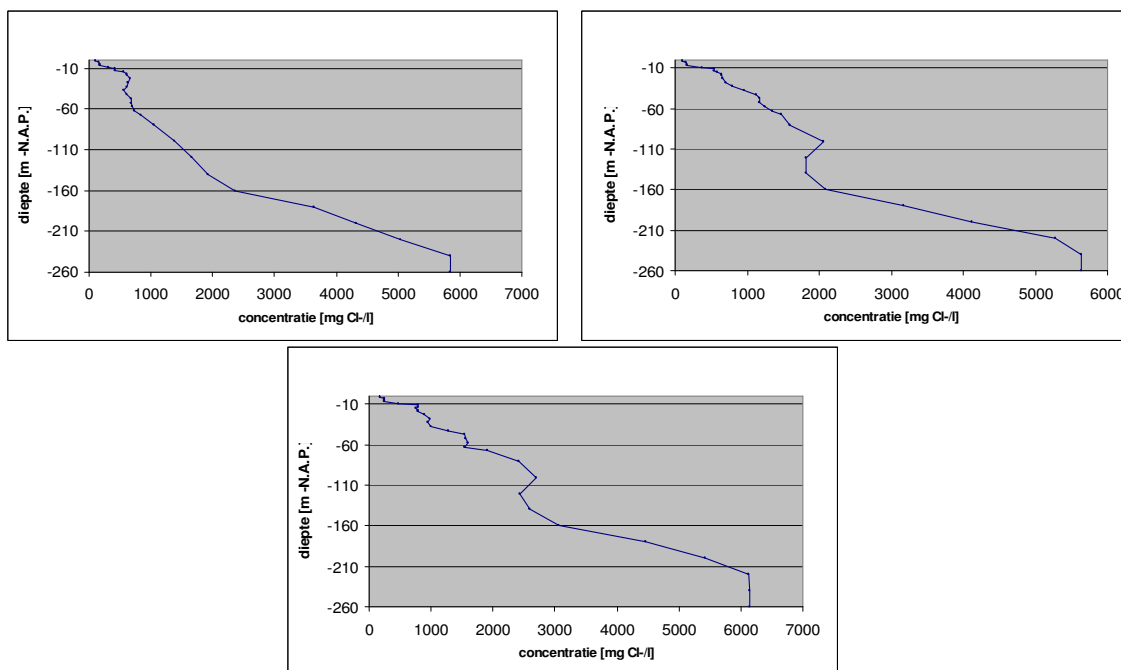
7.4.1.4 Typen initiële chloride concentratie verdeling

Voor alle onttrekkingen in de Provincie Flevoland is de chloride verdeling in de ondergrond bepaald met behulp van het initiële chloride veld van de Provincie Flevoland (Figuur 57). Op basis van deze gegevens zijn drie representatieve initiële chloride concentratie verdelingen bepaald waarvan de effecten op verzilting zijn onderzocht.



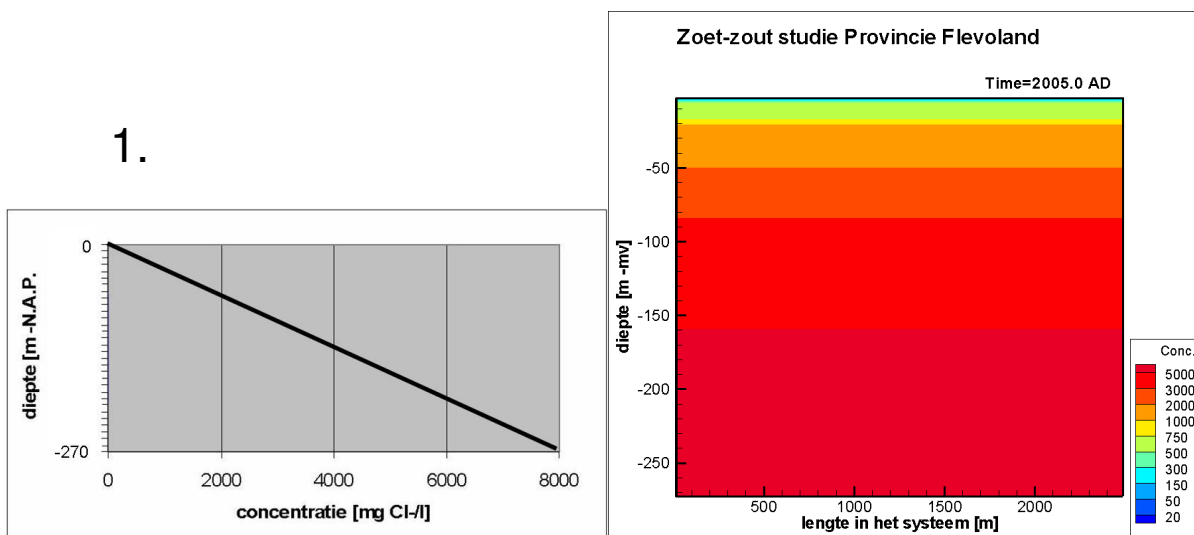
Figuur 57: Chloride concentratie 3D in de Provincie Flevoland.

Het eerste type verdeling is gebaseerd op de gemiddelde chloride concentratieverdeling in de diepte van respectievelijk alle beregeningsonttrekkingen, bronbemalingen en warmte koude opslag onttekingen. Deze gemiddelden zien er als volgt uit:



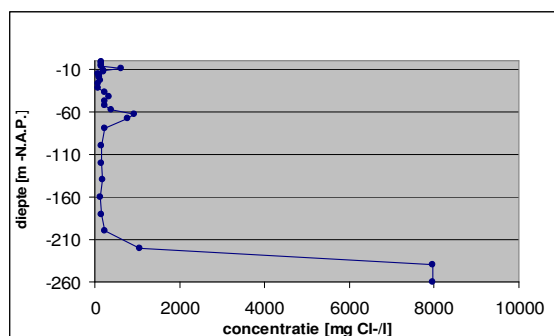
Figuur 58: Gemiddelde chloride verdeling bij respectievelijk alle beregeningsonttrekkingen, bronbemalingen en warmte koude opslag onttekingen.

Daarom is voor het eerste type gekozen voor de volgende initiële chloride concentratie verdeling:



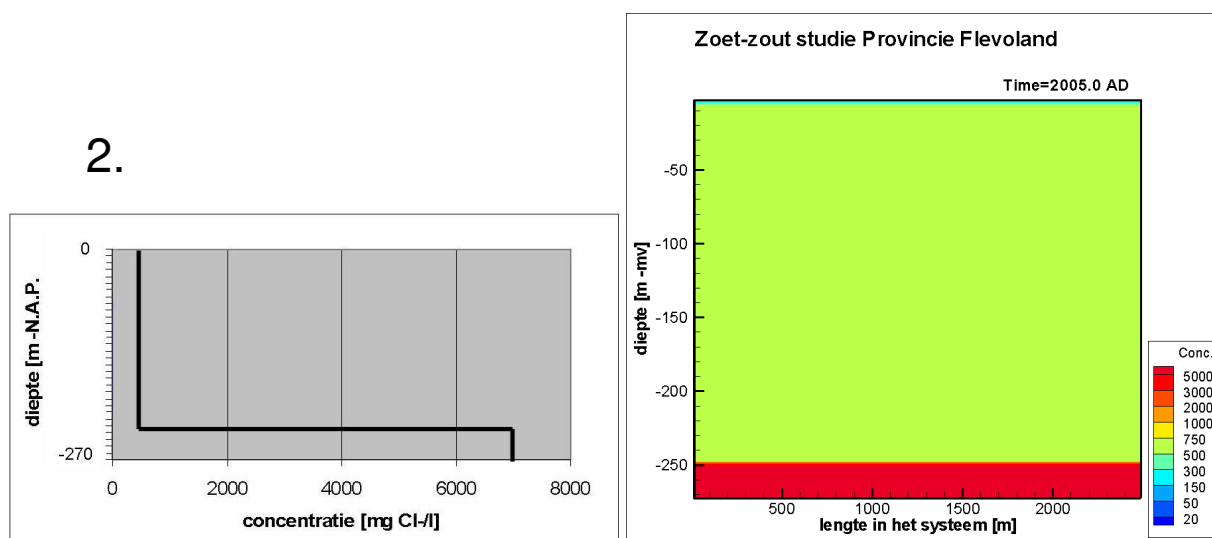
Figuur 59: Type 1 initiële chloride verdeling.

De chloride concentraties in de buurt van enkele putten tonen echter een volgend beeld waarbij slechts in de onderste 50 meter van het model zout water zit:



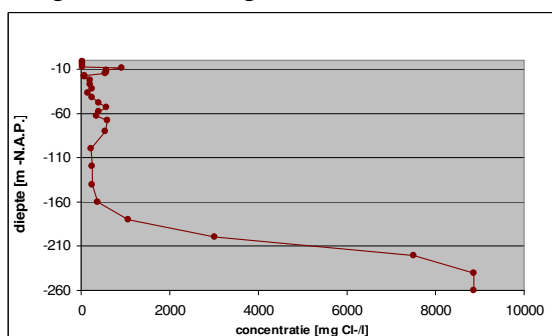
Figuur 60: Voorbeeld van chloride verdeling op de locatie van een onttrekking.

Daarom is voor type 2 gekozen voor deze initiële chloride concentratie verdeling:



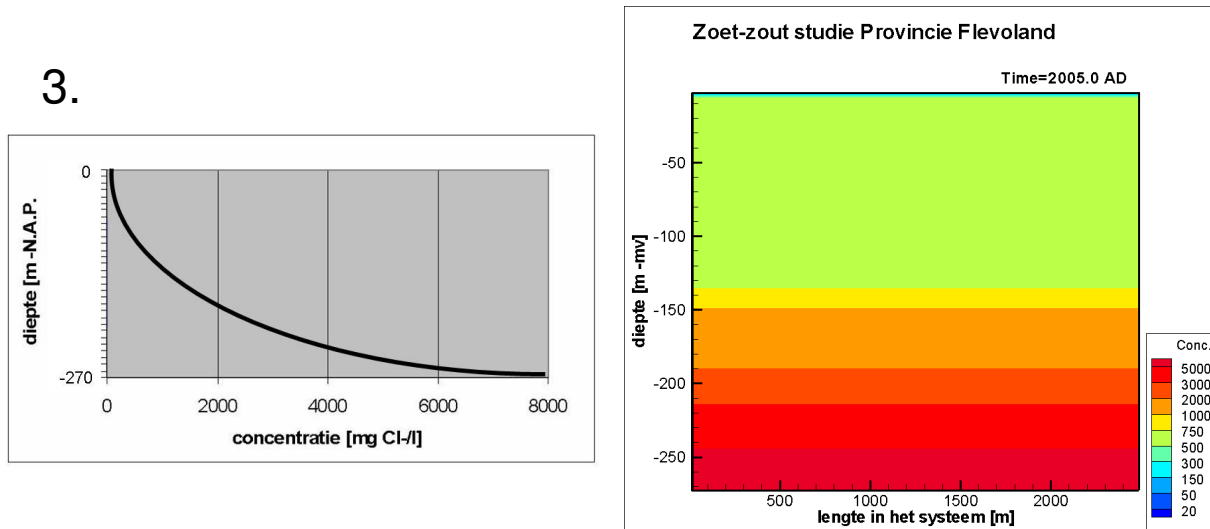
Figuur 61: Type 2 initiële chloride verdeling.

Het derde type initiële verdeling van de chloride concentraties is gebaseerd op verdelingen die er als volgt uitzien:



Figuur 62: Voorbeeld van chloride verdeling op de locatie van een onttrekking.

Dit leidt tot type 3 van de verdeling van de initiële chloride concentratie verdeling:



Figuur 63: Type 3 initiële chloride verdeling.

7.5 Modelresultaten

7.5.1 Inleiding

Op basis van de uitkomsten van de numerieke modelleringen worden zowel de relevante factoren als de trends voor verzilting en verzoeting bepaald. Daarnaast wordt het theoretisch onttrekkingsplafond van de duurzame winbare hoeveelheid zoet grondwater bepaald. Hierdoor ontstaat inzicht in de relevante verziltings- en verzoetingsprocessen bij verschillende onttrekkingsdebieten op de lokale schaal en op de relatief korte termijn (orde jaren).

Nadat de dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en het zouttransport berekend zijn wordt voor enkele van de in hoofdstuk 7.4 beschreven scenario's de chloride concentratie in het grondwater als een functie van de tijd weergegeven waardoor een indicatie wordt gegeven van de reistijd van het brakke en zoute water tot de onttrekking. Tot slot zullen de relevante processen die bijdragen tot opkegeling van brak en zout grondwater worden gesommeerd en zullen aanbevelingen worden gedaan betreffende de kwetsbaarheid van het grondwatersysteem in de Provincie Flevoland.

7.5.2 Normen zoet-zout

Er zijn een aantal zoet-zout normen geïnventariseerd en in samenspraak met de Provincie Flevoland is een klasse-indeling opgesteld. Gewassen kunnen in meerdere klassen kunnen voorkomen. Dit heeft waarschijnlijk te maken met een verschil in methoden die gebruikt zijn voor de onderzoeken, de groeifase van het gewas en of het om een incidentele dan wel structurele berekening gaat. De gebruikte grenzen zijn te vinden in Tabel 7.

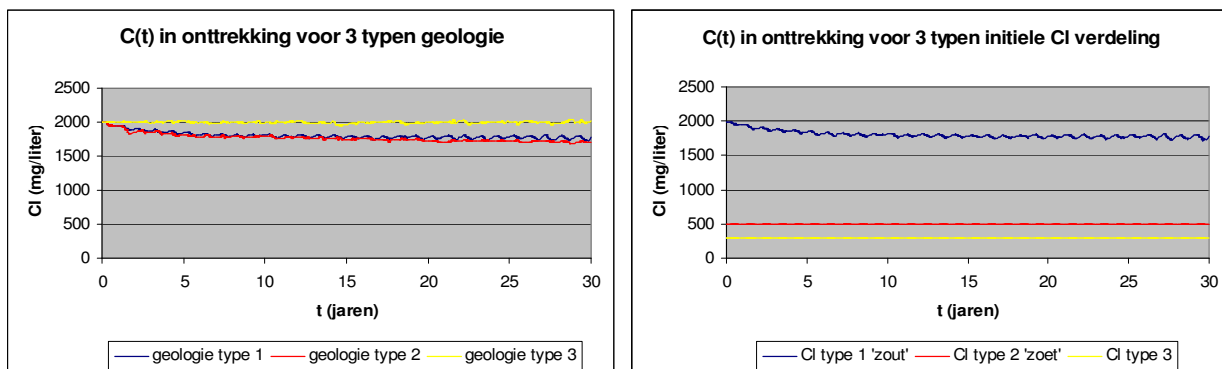
Tabel 7: Voorgestelde zoet-zout grenzen voor verschillende gewassen.

Grenzen:		
groter (mg/l)	kleiner/gelijk (mg/l)	
0	150	substraatteelt, bloembollen
150	500	glastuinbouw, droogteberekening Noordoostpolder, bloembolgewassen, vollegrondstuinbouw, boomkwekerijgewassen, pit- en steenvruchten, sierteelt
500	1000	nachtvorstbestrijding Oostelijk en Zuidelijk Flevoland, witlof, nachtvorstbestrijding Noordoostpolder, aardappelen, bieten, bouwland (algemeen), grasland, fruitbomen, aardappelen, snijmais, aardappel/peen, overige groenten
1000	1500	suikerbieten, glastuinbouw
1500	2000	
2000	>	gras, granen, suikerbieten
	Bronnen:	Actualisatie zouttolerantie gewassen, Alterra 2003 Tabel 5.3.5 Cultuurtechnisch vademecum, 1992 Waterbeheerplan 2007-2011, Waterschap Zuiderzeeland LTO-Noord, 2007

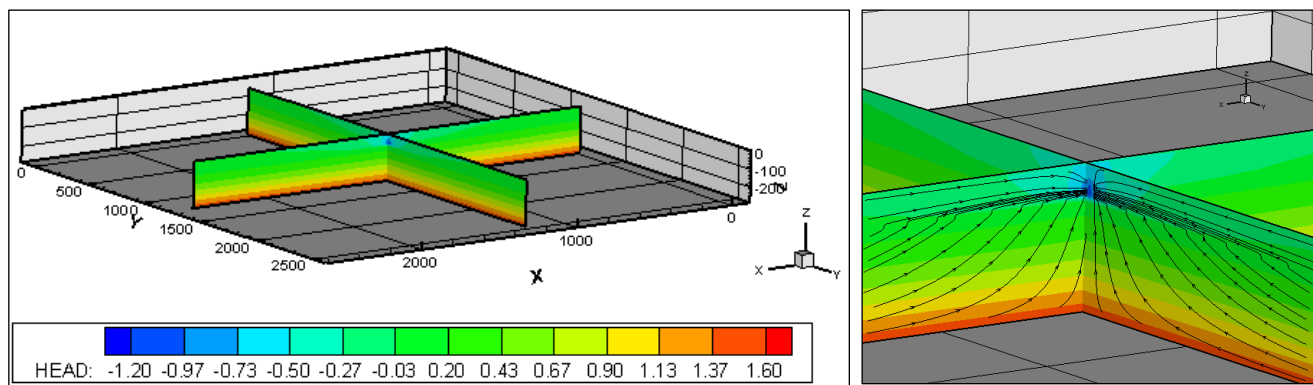
7.5.3 Type berekening ondiep

De onttrekking berekening ondiep ligt 30 tot 60 meter onder maaiveld, dus voor geologie typen 1, 2 en 3 ligt deze onttrekking boven de slechtdoorlatende laag. In Figuur 64a is te zien dat voor deze typen geologie verzoeting optreedt. Het zoete water boven de onttrekking stroomt sneller de onttrekking in dan het zoute water onder de slechtdoorlatende laag. Bij geologie type 2 (grote weerstandslaag) treedt iets meer verzoeting op dan bij geologie type 1 omdat het zoute water van onder de weerstandslaag minder makkelijk de onttrekking kan bereiken.

De chloride concentratie in de onttrekking is echter sterker afhankelijk van het type initiële chloride concentratie verdeling (Figuur 64b). Voor de initiële chloride verdelingen type 1 ('zoet') en type 3 treedt geen verzilting en geen verzoeting op binnen 30 jaar. Bij initiële chloride verdeling type 2 ('zout') treedt verzoeting op bij deze ondiepe onttrekking. Figuur 65 toont de stijghoogte en stroomlijnen na 30 jaar. De schommelingen in de grafieken zijn te verklaren door de soort onttrekking. Tijdens het beregeningsseizoen treedt verzoeting op en het systeem herstelt zich licht als er geen onttrekking plaatsvindt.



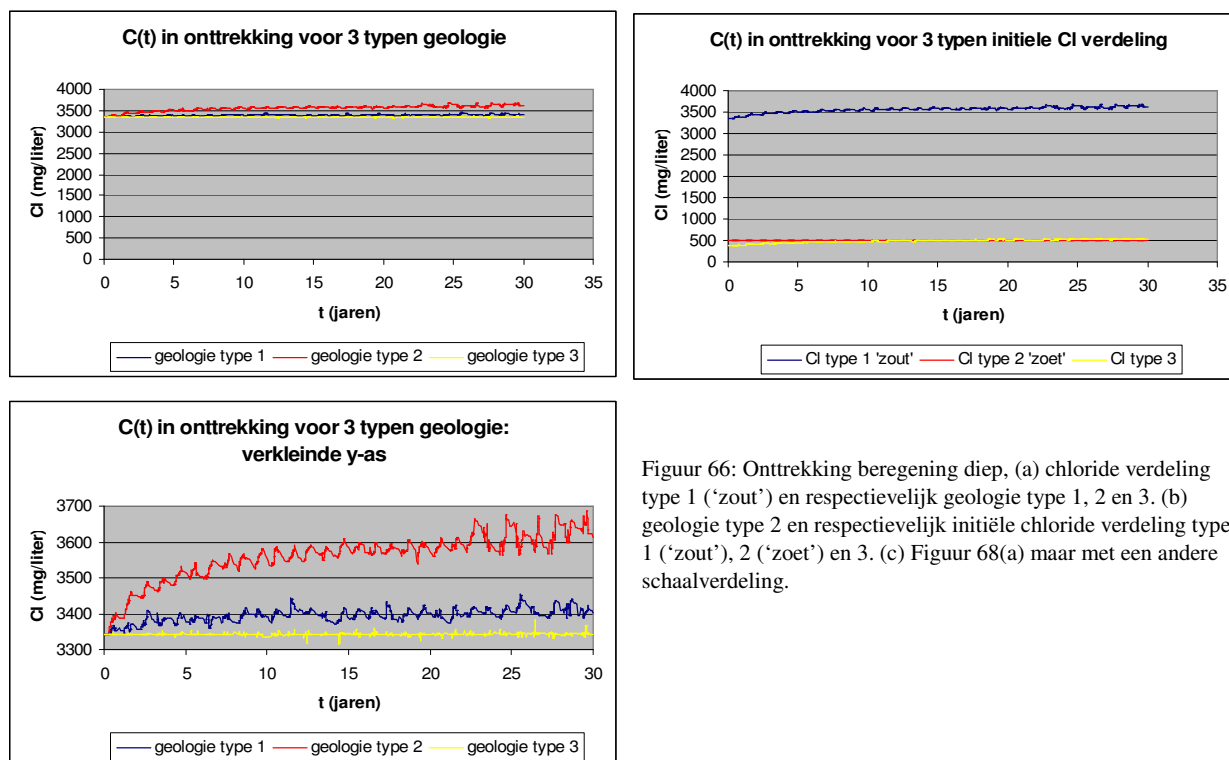
Figuur 64: Onttrekking berekening ondiep, (a) initiële chloride verdeling type 1 en respectievelijk geologie type 1, 2 en 3. (b) geologie type 2 en respectievelijk initiële chloride verdeling type 1 ('zout'), 2 ('zoet') en 3.



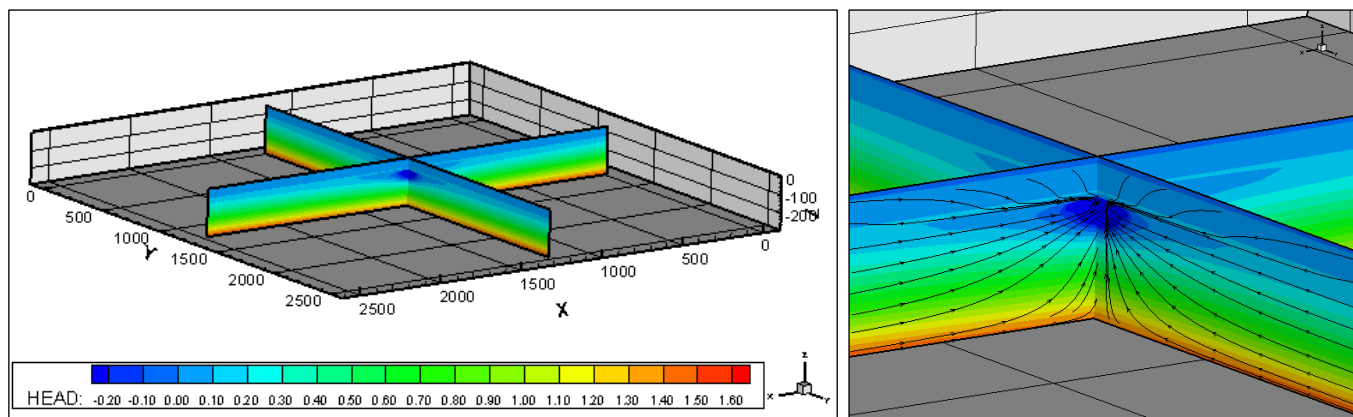
Figuur 65: (a) doorsnede van het 3D gebied: stijghoogte na 30 jaar van onttrekking berekeningsput ondiep met geologie type 1 en initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout'). (b) stroombanen in de buurt van de onttrekking. Voor dit scenario treedt verzoeting op.

7.5.4 Type berekening diep

Figuur 66a toont een afhankelijkheid van het type geologie op de chloride concentratie in de onttrekking. In Figuur 66c is het verschil tussen de typen geologie beter te zien doordat de as met de chloride concentratie verkleind is. Onttrekkingstype berekening diep ligt 80 tot 110 meter onder maaiveld en bevindt zich voor de geologie typen 1 en 2 onder de slechtdoorlatende laag. In Figuur 66c is te zien dat verzilting optreedt voor deze typen geologie. Voor geologie type 2 treedt de meeste verzilting op, dit is te verklaren doordat de onttrekking direct onder de slechtdoorlatende laag ligt. Het zoute water kan makkelijk naar boven stromen richting de onttrekking maar het zoete water boven de grote slechtdoorlatende laag kan de onttrekking niet makkelijk bereiken. In Figuur 66b is de chloride concentratie in de onttrekking te zien voor de 3 typen initiële chloride verdeling. Er is een sterke afhankelijkheid te zien van deze initiële verdeling op de chloride concentratie in de onttrekking. In Figuur 67 is de stijghoogte te vinden voor geologie type 2 en initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout').



Figuur 66: Onttrekking berekening diep, (a) chloride verdeling type 1 ('zout') en respectievelijk geologie type 1, 2 en 3. (b) geologie type 2 en respectievelijk initiële chloride verdeling type 1 ('zout'), 2 ('zoet') en 3. (c) Figuur 68(a) maar met een andere schaalverdeling.

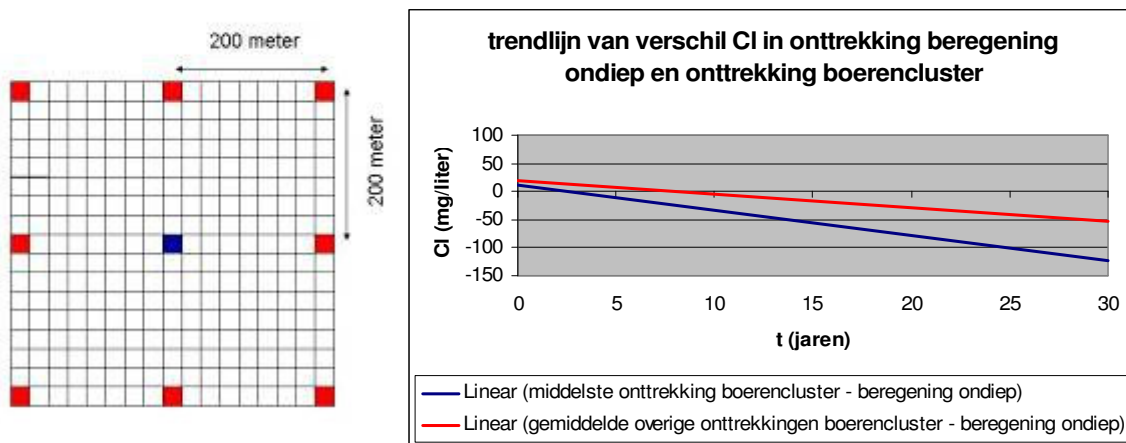


Figuur 67: (a) doorsnede van het 3D gebied: stijghoogte na 30 jaar van onttrekking beregeningsput diep met geologie type 2 en initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout'). (b) stroombanen in de buurt van de onttrekking. Voor dit scenario treedt verzilting op.

7.5.5 Type berekening cluster boeren (ondiep)

Bij de onttrekking boerencluster treedt verzoeting op. De onttrekkingen van het type boerencluster liggen voor alle typen geologie boven de slechtdoorlatende laag waardoor het zoete water makkelijker de onttrekking kan bereiken dan het zoute water dat onder de slechtdoorlatende laag ligt. Verzoeting vindt alleen plaats bij initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout'), bij de andere typen blijft de chloride concentratie constant. In Figuur 68b is de chloride concentratie in onttrekking boerencluster met initiële concentratieverdeling type 1 ('zout') en geologie type 2 (grote weerstandslaag direct onder de onttrekking) vergeleken met onttrekking berekening ondiep onder dezelfde geologische en initiële condities. Hiermee wordt het versterkende effect van het boerencluster in beeld gebracht ten opzichte van de berekening ondiep. De resultaten van deze modellen wijzen op extra verlaagde chloride concentraties in de

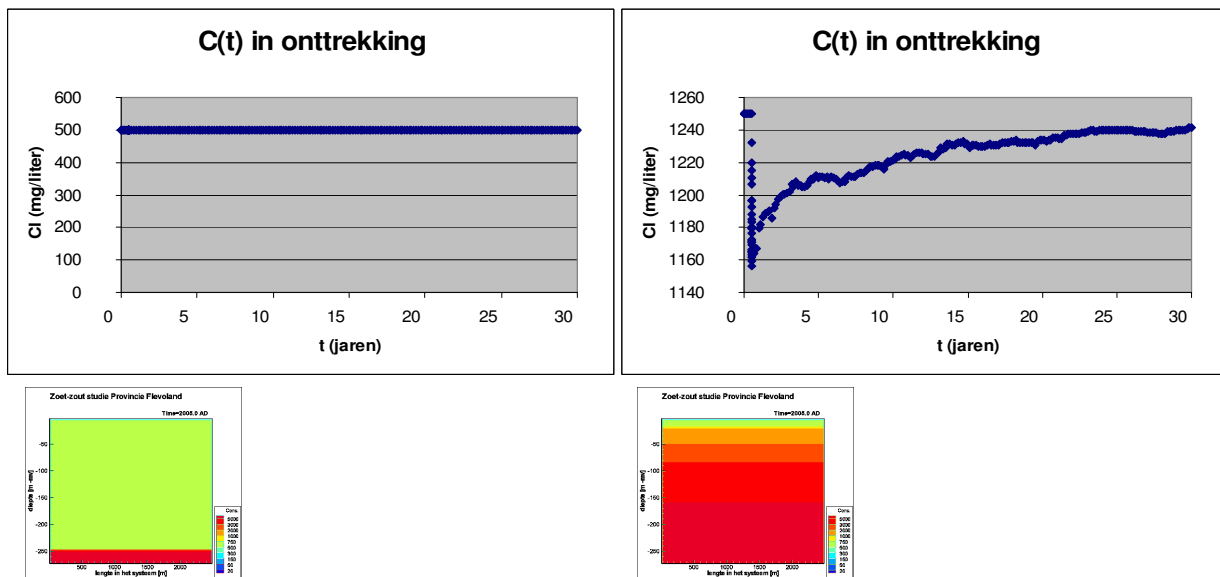
onttrekkingen bij een boerencluster vergeleken met type onttrekking beregning ondiep. De middelste onttrekking van het cluster (blauwe cel in Figuur 68a) heeft een extra verlaagde chloride concentratie. Dit versterkende effect is onafhankelijk van het type geologie.



Figuur 68: (a) ligging van de onttrekkingen in het boerencluster, de kleuren komen overeen met de onttrekkingen in Figuur 69b. (b) trendlijn van het verschil tussen de chloride concentratie in onttrekking boerencluster met initiële concentratieverdeling type 1 ('zout') en geologie type 2 en type beregning ondiep onder dezelfde initiële en geologische condities. De blauwe lijn toont de trend van het verschil voor de chloride concentratie in de middelste onttrekking van het cluster en de rode lijn voor het gemiddelde van de andere 8 onttrekkingen.

7.5.6 Type bronbemaling diep

De onttrekking van het type bronbemaling heeft alleen effect op verplaatsing van zout, brak of zoet grondwater als de chloride verdeling 'zout' is (initieel chloride veld type 1) (Figuur 69) en is vrijwel onafhankelijk van het type geologie. Figuur 69 toont verzoeting in de onttrekking voor initiële chloride verdeling type 1 ('zout'). Na 30 jaar herstelt het systeem zich en is de initiële chloride concentratie weer bereikt.



Figuur 69: Scenario 4 met initiële chloride concentratie verdeling type 2 ('zoet') en geologie type 1 voor type onttrekking bronbemaling diep en scenario 9 met initiële chloride concentratie verdeling type 1 ('zout').

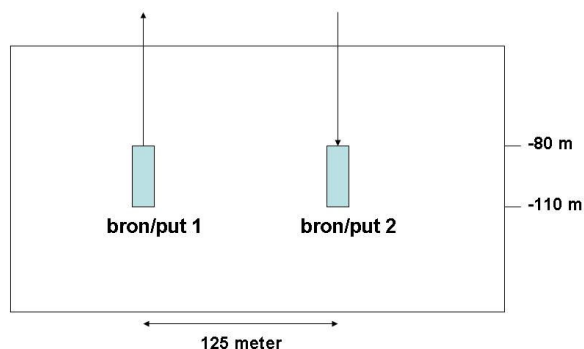
7.5.7 Type koude-warmte opslag

Het type onttrekking Warmte Koude Opslag (WKO) bestaat uit 1 onttrekking en 1 bron van 80 tot 110 meter onder maaiveld met een debiet van 70 m³/uur in de maanden oktober tot en met april en een debiet van 110 m³/uur in de maanden mei tot en met september (Figuur 70). Het dagregime van deze putten is 8 uur aan, 16 uur uit. De afstand tussen de putten is 125 meter. Hoe groter het debiet van een onttrekking hoe sneller de hogere chloride concentraties van lagere modellagen in de onttrekking terecht kunnen komen. Fig. 74 laat zien dat de grotere onttrekking in de zomermaanden zorgt voor meer verzilting in de onttrekking.

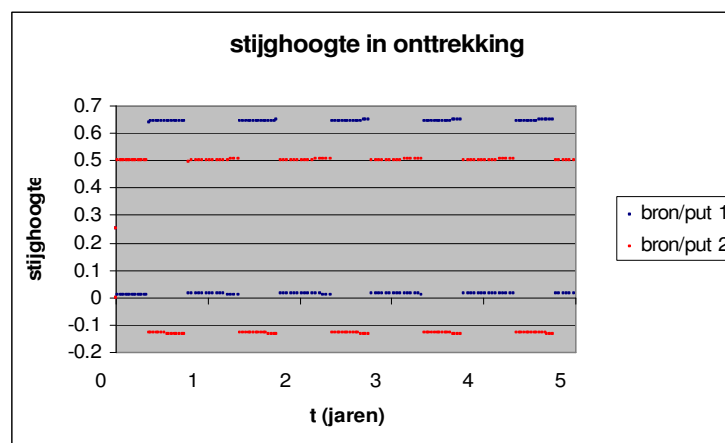
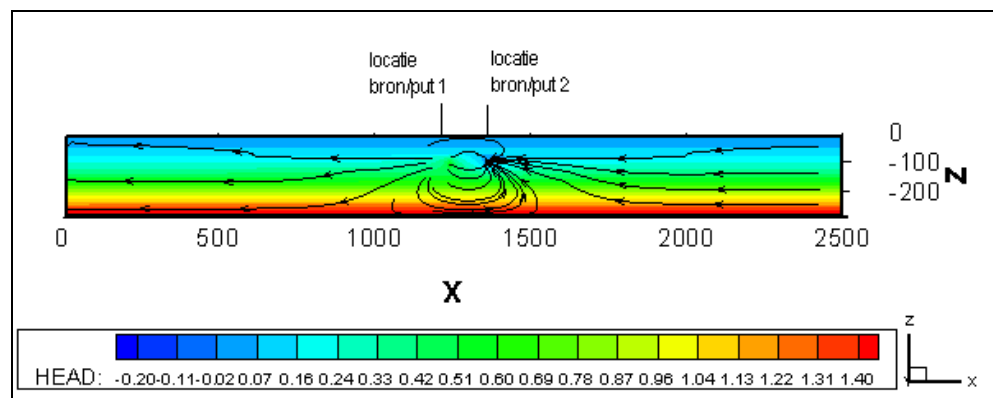
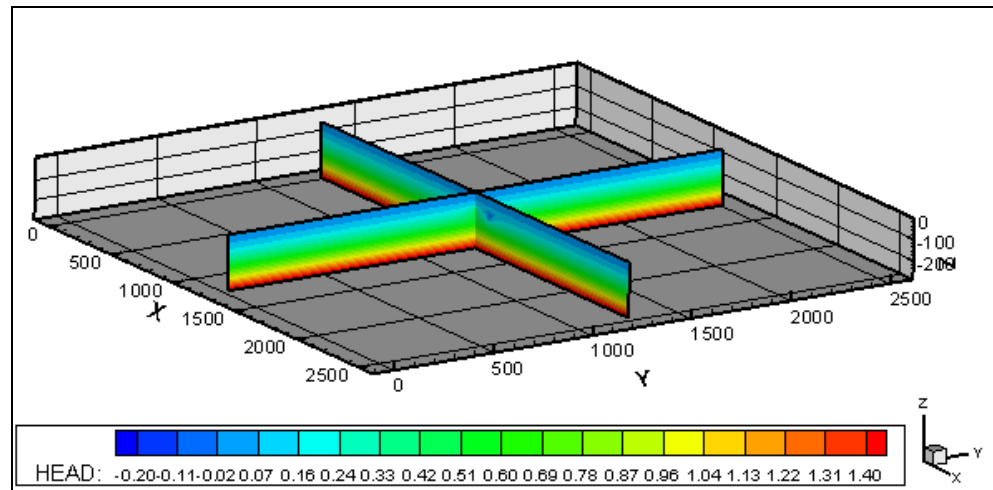
In Figuur 71 en Figuur 72 is te zien dat na 30 jaar bron/put 2 een onttrekkingsput is en bron/put 1 zorgt voor toevoer van water in het grondwatersysteem. Figuur 71c toont de stijghoogte in de onttrekking voor de eerste 5 jaar. Er vindt stroming plaats van bron/put 1 naar bron/put 2 als 2 de onttrekkingsput is en van bron/put 2 naar 1 als 1 de onttrekkingsput is.

De onttrekking ligt 80 tot 110 meter onder maaiveld, dus onder de slechtdoorlatende laag van de geologie types 1 en 2. Er is dus sprake van enige verzilting van het grondwater tijdens de onttrekking.

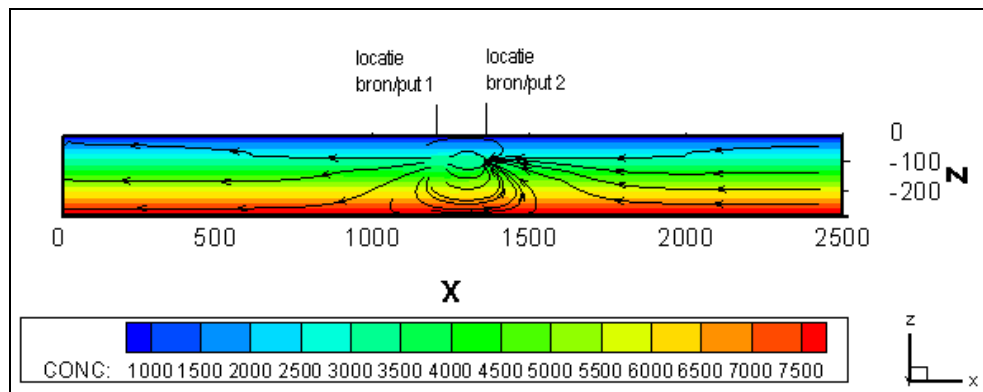
Doordat de stroming tussen bron/put 1 en 2 om de paar maanden van richting verandert kan het grondwatersysteem zich echter goed herstellen. In Figuur 72 is te zien dat de verandering van de chloride concentratie klein is (zijnde van 3350 mg/liter naar maximaal 3450 mg/liter). Het onttrekkingstype koude-warmte opslag heeft dus nauwelijks effect op de chloride concentratie verdeling in de ondergrond.



Figuur 70: Schematisatie van van warmte koude opslag. In oktober tot en met april is er een onttrekking van 70 m³/uur van bron/put 2 naar bron/put 1 en in de maanden mei tot en met september is er een onttrekking van 110 m³/uur van bron/put 1 naar bron/put 2. De afstand tussen bron en put is 125 meter.



Figuur 71: Stijghoogte voor het onttrekkingstype warmte-koude opslag voor geologie type 1 en type initiële chloride verdeling 1 ('zout'). (a) doorsnede van het testgebied na 30 jaar, (b) doorsnede van het testgebied na 30 jaar met de locatie van bron/put 1 en 2 en stroomlijnen en (c) stijghoogte in de onttrekking voor de eerste 5 jaar.



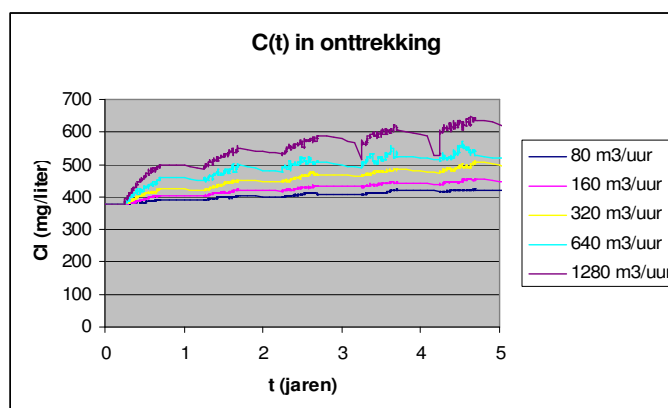
Figuur 72: Chloride concentratie voor het onttrekkingstype warmte-koude opslag voor geologie type 1 en type initiële chloride verdeling 1 ('zout'): doorsnede van het testgebied na 30 jaar met stroomlijnen en de locaties van bron/put 1 en 2.

Draagkracht van het systeem

De voorgestelde chloride grenzen voor de zoet-zout normen liggen bij 150, 500, 1000, 1500 en 2000 mg/liter (tabel 7). Boven deze grenzen is de chloride concentratie in het grondwater te hoog voor de in de tabel 7 genoemde gewassen. Om inzicht te krijgen in de draagkracht van het systeem ten gevolge van grondwateronttrekkingen is ten eerste onderzoek gedaan naar verschillende onttrekkingsdebieten voor type berekening diep met geologie type 1 en initieel chlorideveld type 3. Ten tweede is voor beregeningsput diep onderzoek gedaan naar het verschuiven van het initiële zoet-zout grensvlak van initiële chloride concentratie verdeling type 2 ('zoet') voor geologietype 2. De chloride concentratie in de onttrekking berekening diep met initieel chloride veld type 1 ('zout') is meer dan 3300 mg/liter (zie Figuur 66), dus voor dit type chloride concentratie verdeling zijn alle zoet-zout grenzen al overschreden. Er is dan ook geen verder onderzoek gedaan voor dit type initiële chloride concentratie verdeling.

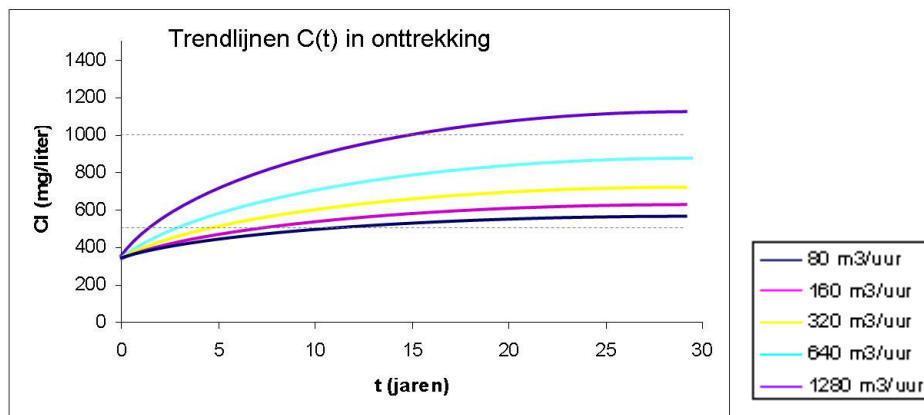
Initieel chloride veld type 3 kan de grenzen van de draagkracht van het systeem bereiken, dit is echter afhankelijk van de grootte van de onttrekking. In Figuur 73 is de chloride concentratie als functie van de tijd te zien voor de beregeningsput diep met verschillende debieten. Tijdens het beregeningsseizoen neemt de chloride concentratie in de onttrekking toe, tijdens het regenseizoen zakt deze concentratie weer naar beneden. Dit proces wordt het volgende jaar herhaald, waarmee de periodieke schommelingen in de grafieken te verklaren zijn. In

Figuur 74 zijn de trends weergegeven voor de maximale chloride concentratie in de onttrekking voor de verschillende onttrekkingsdebieten. Met het huidige onttrekkingsdebiet van 80 m³/uur wordt de grens van 500 mg/liter chloride binnen 15 jaar overschreden volgens het gebruikte model voor dit scenario. De grens van 1000 mg/liter chloride zal volgens het model alleen met een onttrekking van 1280 m³/uur worden overschreden.



Figuur 73: Chloride concentratie als functie van tijd voor beregeningsput diep, initiële chloride verdeling type 3 en geologietype 1 (scenario 12) voor verschillende onttrekkingsdebieten. Het

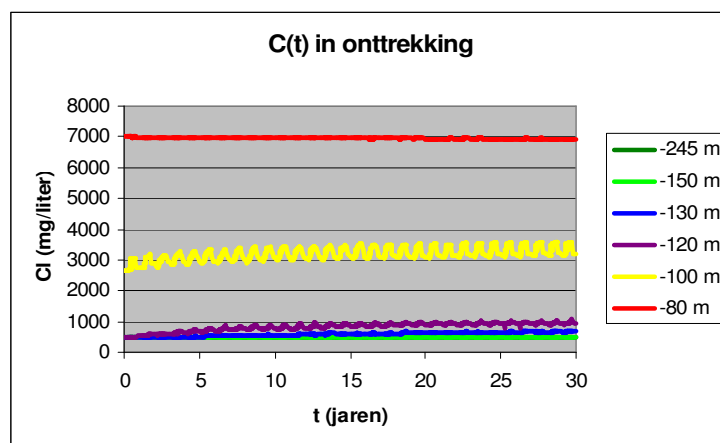
huidige onttrekkingsdebiet is 80 m³/uur.



Figuur 74: Trends van de chloride concentratie als functie van tijd voor de komende 30 jaar voor beregeningsput diep, initiële chloride verdeling type 3 en geologietype 1 voor verschillende onttrekkingsdebieten. Het huidige onttrekkingsdebiet is 80 m³/uur.

De vorige figuren lieten resultaten zien voor initiële chloride verdeling type 3. Voor initiële chloride verdeling type 2 ('zoet') wordt daarentegen voor alle geologietypen de grens van 150 mg/liter chloride altijd overschreden, omdat het grondwater initieel al 500 mg/liter chloride bevat op de plaats van de onttrekking. De andere grenswaarden worden echter nooit overschreden, zelfs met erg grote onttrekkingen van 2560 m³/uur treedt geen verzilting op. Om inzicht te krijgen in de draagkracht van het systeem wordt het initiële zoet-zout grensvlak opgeschoven. Voor dat verschoven veld is vervolgens bepaald wat de huidige chloride concentratie en de concentratie over 30 jaar is in de onttrekking berekening diep met geologie type 2. Op deze manier kan bepaald worden onder welke omstandigheden verzilting zal optreden voor onttrekkingstype berekening diep.

In Figuur 75 is de invloed te zien van de verschuiving van het scherpe zoet-zout grensvlak op de chlorideconcentratie in de onttrekking. Onttrekkingstype berekening diep ligt 80-110 meter –mv en Figuur 75 laat zien dat verzilting in deze onttrekking alleen optreedt indien het scherpe zoet (500 mg/l)- zout (7000 mg/l) grensvlak hoger ligt dan 150 m-mv. Indien dit grensvlak op 80m –mv ligt (de rode lijn), bevindt de onttrekking zich dus in het zoute gebied en is de chloride concentratie in de onttrekking zowel nu als over 30 jaar 7000 mg/l.



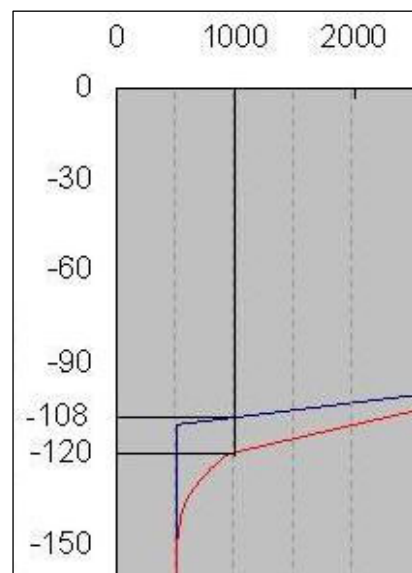
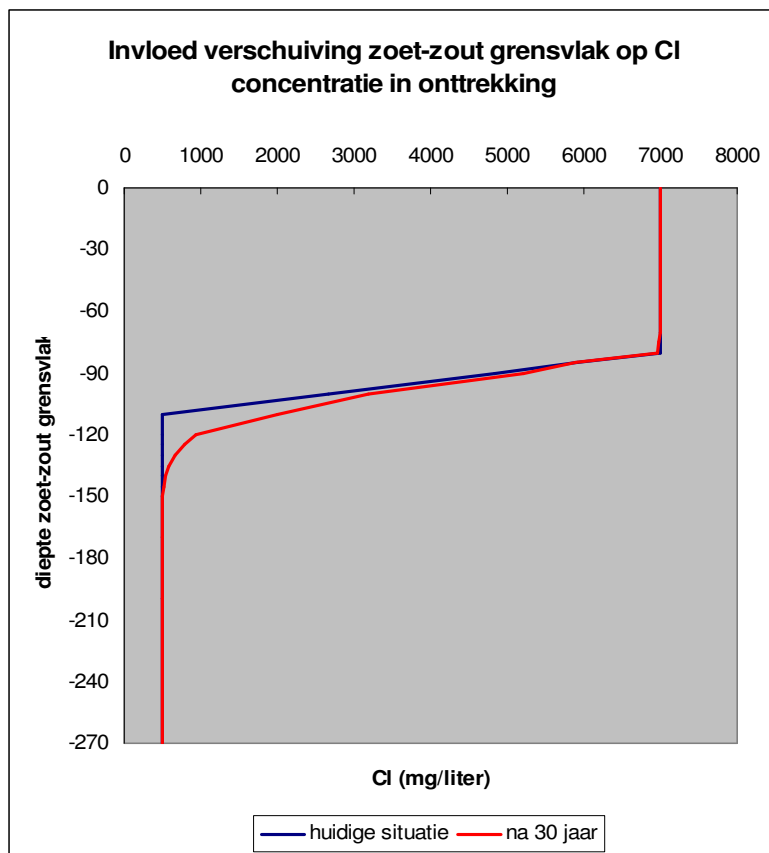
Figuur 75: Invloed van de verschuiving van het scherpe zoet-zout grensvlak op de chlorideconcentratie in de onttrekking. Onttrekkingstype berekening diep ligt 80-110 meter –mv, geologie type 2. Voor verschillende diepten van het zoet-zout grensvlak is de chloride concentratie in deze

onttrekking te zien.

Figuur 75 laat zien dat de chloride concentratie in de onttrekking afhankelijk is van de diepte van het scherpe zoet-zout grensvlak. De chloride concentratie in de onttrekking als functie van de diepte van dit grensvlak voor $t=0$ jaar en $t=30$ jaar kan gevonden worden in Figuur 76.

In Figuur 76a is de concentratie in de onttrekking te zien voor de huidige situatie en de situatie over 30 jaar voor zoet-zout grensvlakken die liggen op een diepte van 0 tot 270 meter onder het maaiveld. De grafiek kan bijvoorbeeld gebruikt worden om voor de chloride norm van 1000 mg/liter te kijken hoe diep het zoet-zout grensvlak mag liggen om ook over 30 jaar deze grens niet te bereiken in de onttrekking van beregeningsput diep. Daarnaast is te zien dat verzilting in dit type onttrekking alleen optreedt indien het zoet-zout grensvlak dieper ligt dan 150 m-mv, dus als de afstand van de onderkant van de onttrekking tot het scherpe grensvlak minder is dan 40 meter.

In Figuur 76b is het voorbeeld van 1000 mg/liter genomen. Voor de huidige situatie is een diepte van het initiële zoet-zout grensvlak van 108 meter onder het maaiveld voldoende om deze norm te halen, maar om deze norm over 30 jaar nog steeds te kunnen halen zal het zoet-zout grensvlak dieper moeten liggen dan 120 meter onder het maaiveld (dus meer dan 10 meter onder de onderkant van de onttrekking). Om nog verder in de toekomst ook aan deze norm te kunnen voldoen kan verwacht worden dat de diepe beregeningsputten op locaties gelegd moeten worden waar het zoet-zout grensvlak nog dieper ligt. De scherpe hoeken in de grafiek van de huidige situatie zijn een oorzaak van de celgrootte van het model. Voor hele kleine cellen, dus ook in de praktijk, zal deze lijn een glad verloop hebben.



Figuur 76: (a) Invloed van de verschuiving van het scherpe zoet-zout grensvlak op de chloride concentratie in de onttrekking; huidige situatie en situatie na 30 jaar. Onttrekkingstype beregening diep en geologietype

2. (b) voorbeeld voor de chloridenorm van 1000 mg/liter: om deze norm te halen moet het zoet-zout grensvlak initieel dieper liggen dan 120 meter voor beregeningsput diep.

7.6 Conclusies

Door middel van de numerieke modellering van zoet-brak en zout grondwater ter plaatse van grondwateronttrekkingen kan het volgende geconcludeerd worden:

- Er treedt verzoeting op indien de onttrekking plaatsvindt boven de slechtdoorlatende laag. Relatief zoet oppervlaktewater kan hierdoor gemakkelijk naar de onttrekking toestromen, terwijl het brakke tot zoute grondwater door de scheidende laag op afstand wordt gehouden. Een cluster van onttrekkingen boven de slechtdoorlatende laag heeft een versterkend effect op de verzoeting;
- Verzilting treedt op indien de onttrekking plaatsvindt onder de slechtdoorlatende laag en het zoute grensvlak niet ver weg ligt;
- Hoe hoger de weerstand van de slechtdoorlatende laag, hoe meer verzilting of verzoeting in de onttrekking;
- Voor onttrekkingen van korte duur (type bronbemaling) herstelt het grondwatersysteem zich binnen 30 jaar;
- Het type initiële chloride verdeling heeft een grote invloed op de chloride concentratie in de onttrekking voor de onttrekkingstypes beregening ondiep, beregening diep, boerencluster en bronbemaling. Hoe hoger de huidige chlorideconcentratie in het grondwater in de buurt van de onttrekking, hoe hoger de chlorideconcentratie in de onttrekking. De gemiddelde chlorideverdeling in de buurt van onttrekkingen in Flevoland lijkt op chlorideverdeling type 1 ('zout'). Voor dit type betekent dat dat de chloride concentratie in de ondiepe onttrekkingen (30 – 60 m -mv) nu al 880 – 1760 mg Cl/l is en in de diepe onttrekkingen (80 – 110 m -mv) al 2370 – 3260 mg Cl/l;
- Onttrekkingstype warmte-koude opslag heeft bijna geen invloed op de chloride concentraties in het grondwater;
- Hoe groter het debiet van de onttrekking hoe sneller chloride concentratie normen worden overschreden;
- Bij een initieel scherp zoet-zout grensvlak treedt alleen verzilting op in de onttrekking als de afstand tussen de onderkant van de onttrekking en het grensvlak kleiner is dan 40 meter.

8 Risico-analyse op basis van slechtdoorlatende lagen en grensvlakken

8.1 Inleiding

Voor het bepalen van de risico's voor het omhoogkomen van het zoet-zout grensvlak als gevolg van putonttrekkingen, zijn de volgende factoren van belang:

- Diepte van het chloride grensvlak (m);
- Zoet-zout inversies;
- Aanwezigheid en diepte van slechtdoorlatende lagen;
- Diepte van de onttrekkingsfilter (m);
- Debiet van onttrekking (m^3/uur).

Om de risico's voor verzilting in te schatten, is in eerste instantie voor iedere put vastgesteld of er een slechtdoorlatende weerstandslaag bevindt tussen het chloride grensvlak en de filter van de put. In verschillende stappen (weergegeven in Figuur 77) is getoetst of er op iedere putlocatie aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

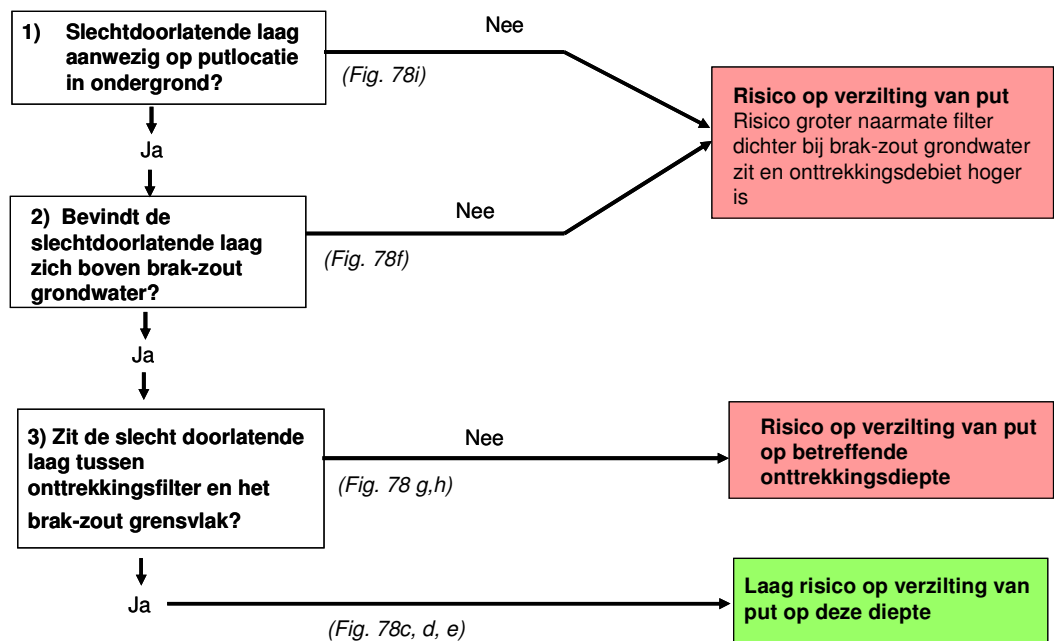
- 1) Er is minimaal één slechtdoorlatende laag op de putlocatie aanwezig die zich boven het chloride grensvlak bevindt;
- 2) De filter van de put bevindt zich boven de top van betreffende scheidende laag die zich boven het chloride grensvlak bevindt.

Alleen voor de putten die volledig aan beide voorwaarden voldoen, kan geconcludeerd worden dat er een laag risico is voor het omhoogkomen van brak-zout grondwater als gevolg van putonttrekkingen. Een kans van opkegeling van brak-zout grondwater is echter altijd aanwezig; het volledig uitsluiten van een risico is niet mogelijk. Brak grondwater is altijd aanwezig in dit gebied, in elk geval op grote diepte, en slechtdoorlatende lagen zijn niet volledig continue.

Als er niet aan beide voorwaarden wordt voldaan, dan valt de put onder de categorie 'hoog' wat niet automatisch een hoog risico op voor verzilting betekent maar meer een potentieel risico. Voor de putten waarvoor dit het geval is speelt voornamelijk het onttrekkingsdebiet en de afstand tussen de filter van de put en het chloride grensvlak een rol voor het verziltingsrisico.

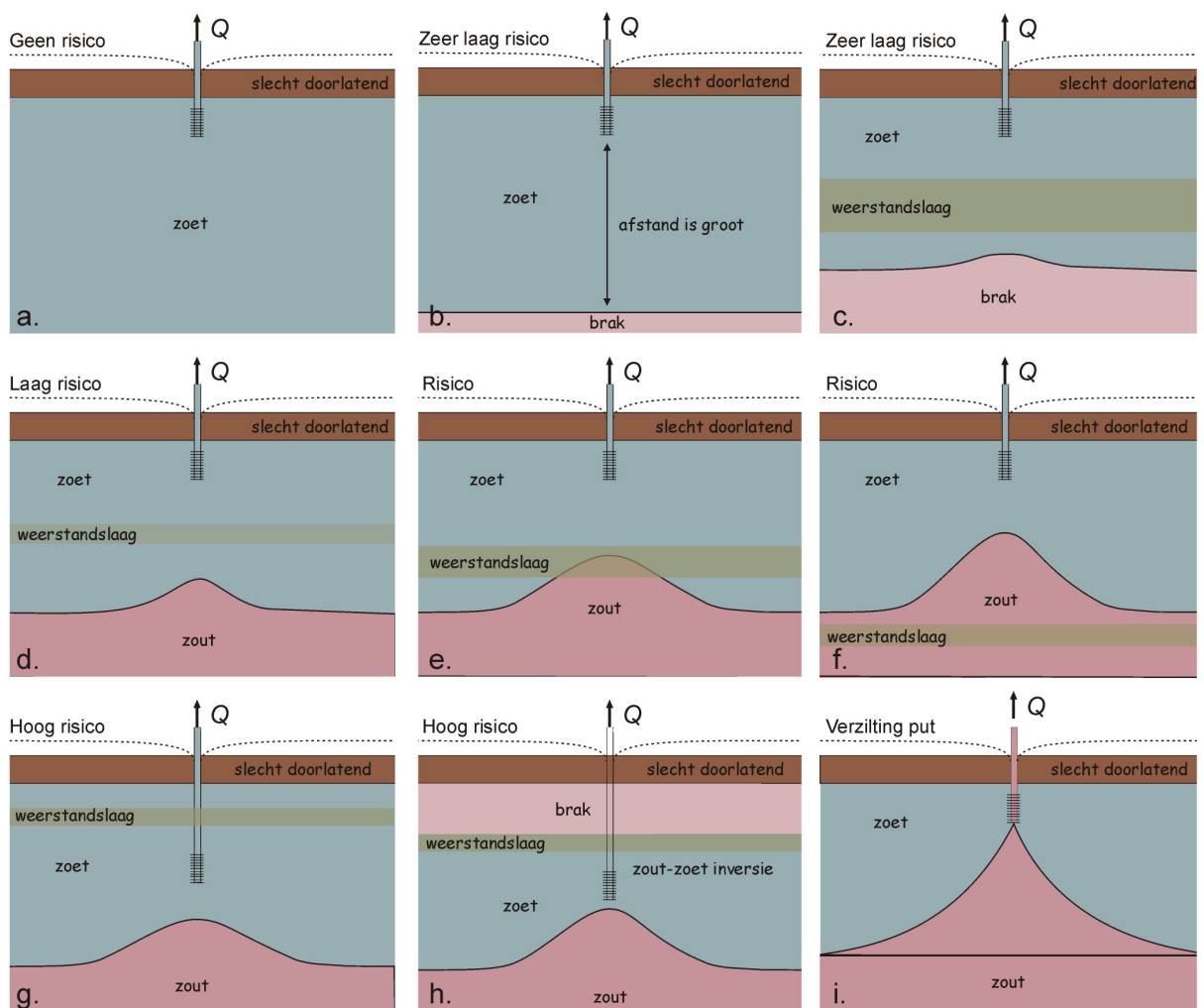
Daarnaast kan het aanwezig zijn van chloride inversies rond de diepte van de filter ook van invloed zijn op het risico voor verzilting. Deze zijn daarom apart als laatste stap in onze analyses meegenomen.

Een belangrijke aanname voor methode is dat alle vier de scheidende lagen dik genoeg zijn en voldoende weerstand bieden tegen het omhoog stromen van zout grondwater. De analyses zijn uitgevoerd voor chloride grensvlakken van 500 mg/l, 1000 mg/l en 2000 mg/l (gelieerd aan *Klassenindeling chloride concentratie aan de hand van gewassen*, tabel 7). Naast de risico's voor verzilting op de bestaande putlocaties, zijn er ook gebiedsdekkende risico-analyses uitgevoerd waarbij is uitgegaan van een onttrekkingsdiepte van 20 m, 40m en 60m. Dit geeft inzicht in de delen van het gebied waar weinig verziltingsrisico's te verwachten zijn als op betreffende diepte putten worden geslagen.



Figuur 77: Stappenschema risico-analyse putlocaties.

Het concept van risico van opkegeling van brak en out grondwater is weergegeven in Figuur 78. Hierin zijn negen verschillende situaties gevisualiseerd, waarbij van linksboven naar rechtsonder een toename plaatsvindt in het risico voor verzilting van de onttrekkingsput. Indien er geen zout grondwater aanwezig is (situatie a, Figuur 78) is er uiteraard geen risico. Als er wel brak of zout grondwater aanwezig is, maar de afstand tussen de put en het brakke grondwater is groot, dan is het risico zeer laag (situatie b). Bevindt zich tussen de filter en het zoet-zoute grensvlak een weerstandslaag, dan is de verplaatsing van het grensvlak beperkt en blijft het risico zeer laag tot laag (situatie c en d). Wel neemt de opkegeling toe naarmate de weerstandslaag dunner is en het onderliggende grondwater zouter is (situatie d). Als het grensvlak zich in de weerstandslaag bevindt (of door opkegeling in de loop der tijd gaat bevinden) dan ontstaat er een risico-situatie (situatie e). Er is sprake van een (hoog) risico indien de weerstandslaag zich niet tussen de filter van de put en het zoet-zout grensvlak bevindt, maar zich onder het grensvlak bevindt (situaties f, g en h), waardoor het zoute water vrij toegang heeft naar de filter van de put. Dit kan er uiteindelijk toe leiden dat de put gaat verzilten. Het risico op verzilting is het hoogst als er geen weerstandslaag in de ondergrond aanwezig is en er daardoor veel zout water aanwezig is dat omhoog kan worden gepompt (situatie i). Situatie h is trouwens een speciaal geval: ondanks het feit dat er brak grondwater boven de zoetwatervoorraad aanwezig is (inversie), kan grondwater onttrokken worden; een gevoelig systeem is het wel: gaten in de weerstandslaag zal het risico vergroten.



Figuur 78: Mogelijke onttrekkingssituaties in het studiegebied van de Provincie Flevoland.

8.2 Resultaten

8.2.1 Locaties bestaande putten

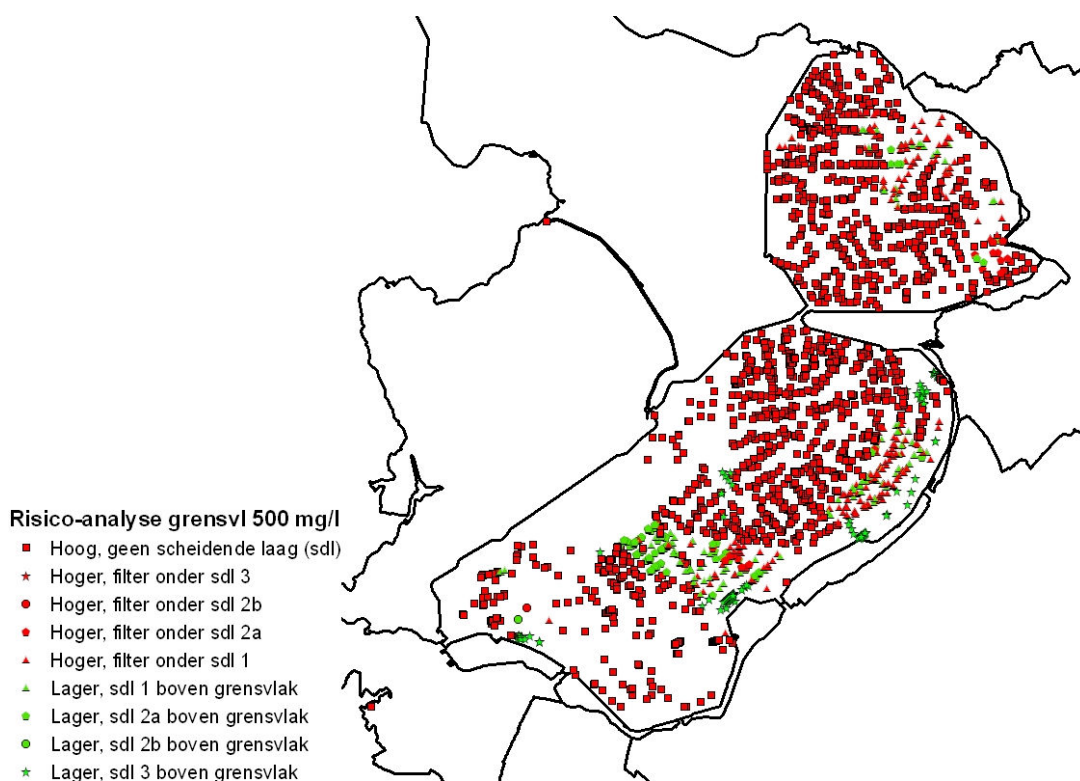
De resultaten van de risico-analyses voor de bestaande putten uitgaande van de grensvlakken 500 mg/l, 1000 mg/l en 2000 mg/l zijn weergegeven in Figuur 79a t/m c. De putten waar een hoog risico bestaat op het omhoogkomen van het chloride grensvlak als gevolg van onttrekking zijn met rode symbolen weergegeven. De putten waar weinig risico te verwachten is doordat er een scheidende laag zich tussen het chloride grensvlak en de filter bevindt, zijn met groene symbolen aangegeven. De vorm van de symbolen corresponderen met de slechtdoorlatende laag (SLD1, SLD2a, SLD2b of SLD3, zie ook Bijlage A) die zich vlak boven het chloride grensvlak bevindt. Tenslotte: een rood vierkantje is gebruikt om de putten aan te geven waar geen scheidende laag boven het chloride grensvlak aanwezig is in de ondergrond.

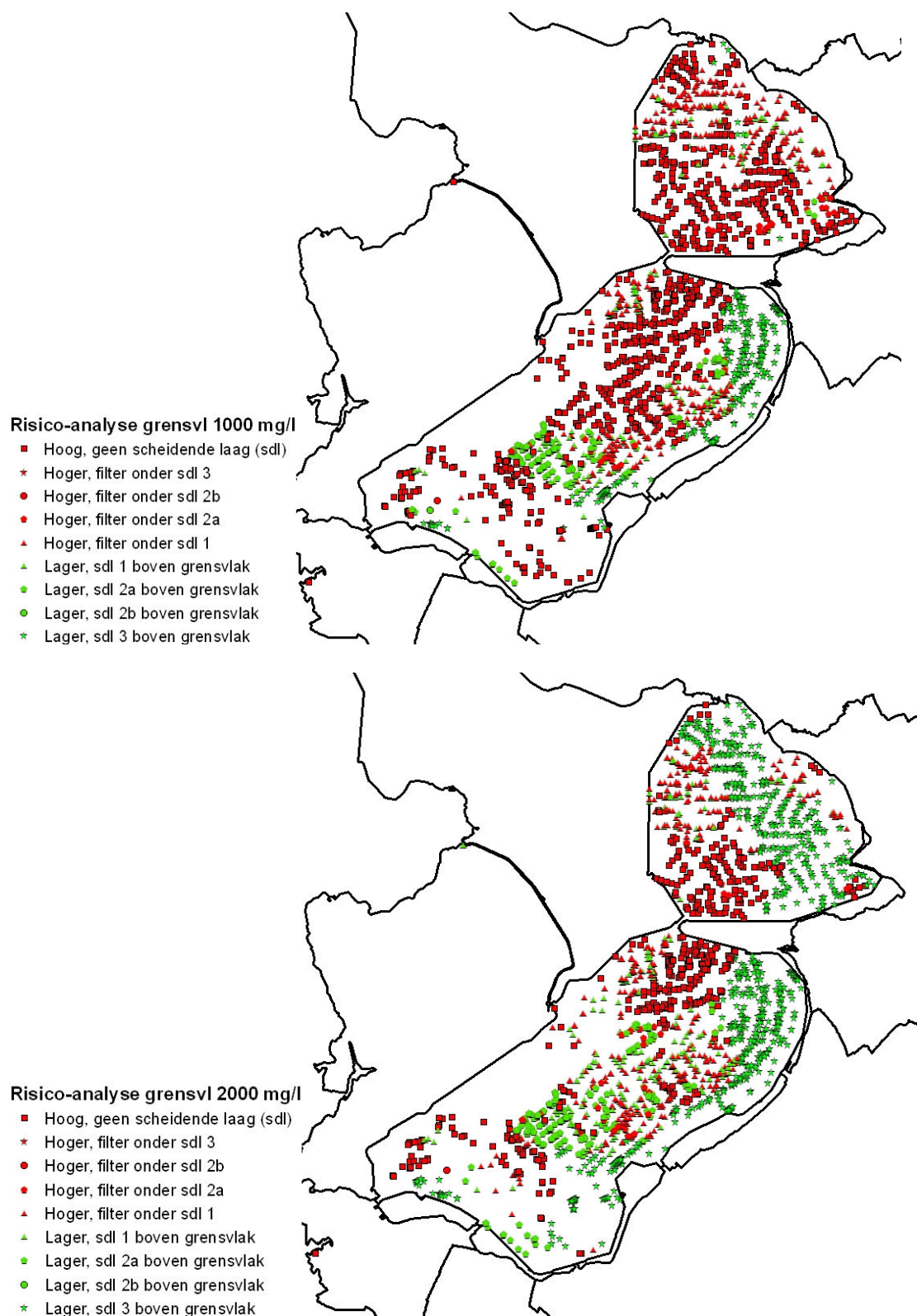
Bij het vergelijken van de resultaten voor chloride grensvlakken van 500 mg/l, 1000 mg/l en 2000 mg/l is duidelijk te zien dat het risico op verzilting van de putten duidelijk toeneemt naarmate het “zoet-zout” grensvlak dat als referentie wordt gebruikt een

lagere chloride concentratie heeft en vice versa. In Tabel 8 zijn de percentages berekend voor putten waar een mogelijk risico en waar juist weinig risico aanwezig is op verzilting, uitgaande van de drie verschillende grensvlakken. Hieruit blijkt dat voor het grensvlak van 500 mg/l er in totaal 85% van de putten behoren tot de categorie “Potentieel hoog risico” en slechts 14% tot “laag risico”, terwijl dit voor het grensvlak van 2000 mg/l respectievelijk 44% en 56% is (bijna een halvering in % putten met potentieel hoog risico).

Tabel 8: Percentages van putten met potentieel hoog of laag risico in de Provincie Flevoland.

	Potentieel hoog risico geen SDL boven cl-grensvl	Potentieel hoog risico wel SDL boven cl-grensvl maar SDL boven filter	Laag risico wel SDL boven cl-grensvl en filter boven SDL
500 mg/l	74%	11%	14%
1000 mg/l	46%	25%	29%
2000 mg/l	24%	20%	56%



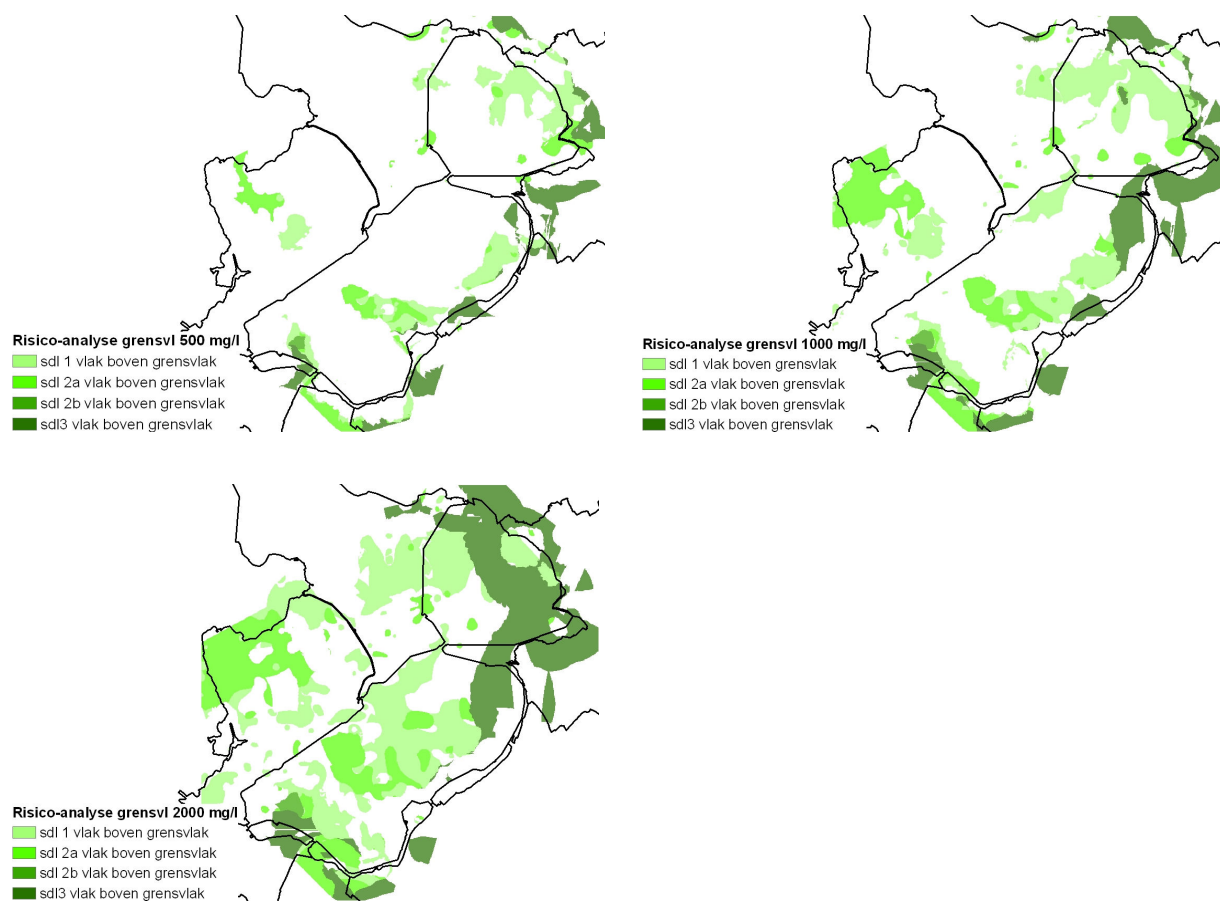


Figuur 79: Risico-analyse voor putlocaties uitgaande van chloride grensvlak van 500 mg/l, 1000 mg/l en 2000 mg/l.

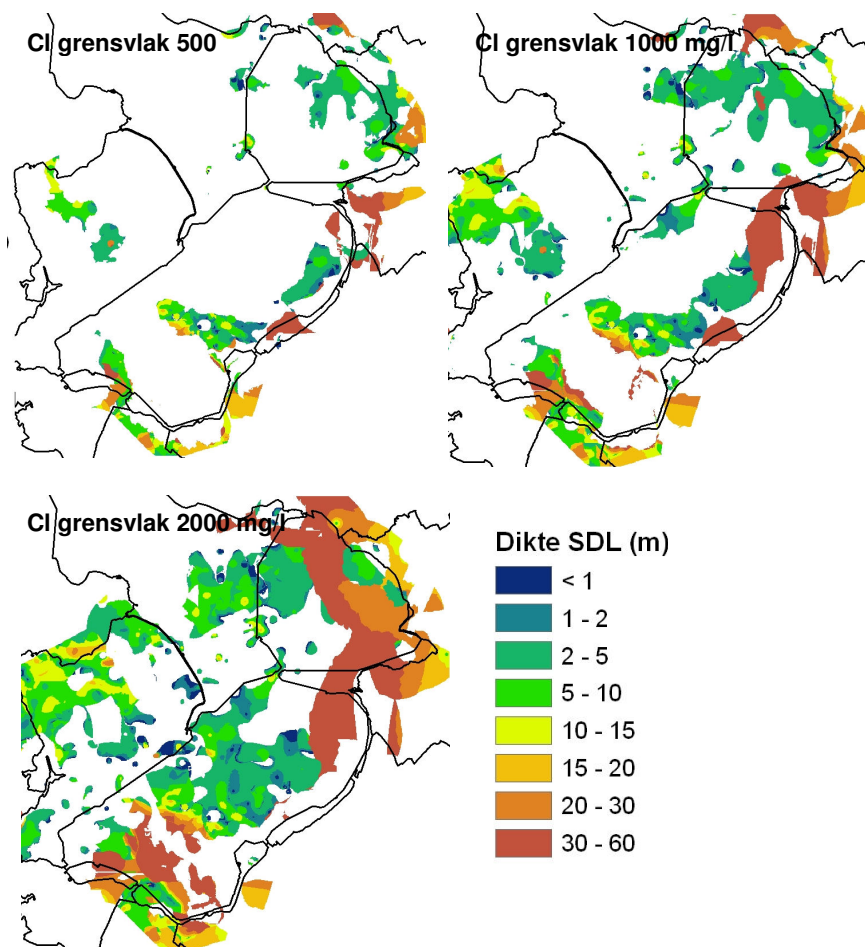
8.2.2 *Gebiedsdekkend: hoog tot laag risico*

Gebiedsdekkend is vastgesteld in welke delen van het gebied er een slechtdoorlatende laag boven het chloride grensvlak bevindt (Figuur 78c, Figuur 78d en Figuur 78e). De resultaten hiervan voor het chloride grensvlak van 500 mg/l, 1000 mg/l en 2000 mg/l zijn weergegeven in Figuur 80a-c. De verschillende tinten groen corresponderen met de diepst liggende scheidende laag (SLD1, SLD2a, SLD2b of SLD3, zie Bijlage A) die zich boven het chloride grensvlak bevindt (Figuur 81). Wanneer de figuren met elkaar vergeleken worden dan blijkt duidelijk dat de grootte van het oppervlak waar deze situatie zich voordoet toeneemt naarmate een grensvlak met een hogere chloride concentratie wordt gebruikt (2000 mg/l vs. 500 mg/l). Ook valt op dat het oppervlak, waarbij de diepere slechtdoorlatende laag (SLD3) een barrière vormt, duidelijk groter is voor 2000 mg/l dan voor 500 mg/l. Dit komt doordat het grensvlak van 2000 mg/l zich (in het algemeen) dieper bevindt dan 500 mg/l.

De delen van het gebied die niet groen zijn gekleurd (wit achterblijven), zijn gebieden waar een slechtdoorlatende laag in de ondergrond ontbreekt, of waar de slechtdoorlatende laag zich onder het chloride grensvlak bevindt (dus geen barrière aanwezig, Figuur 78a, Figuur 78b, Figuur 78f en Figuur 78i). Deze worden als potentieel hoog risicogebied aangeduid. Hier is met name het onttrekkingsdebiet en de afstand tussen de onttrekkingsdiepte en diepte van chloride grensvlak bepalend voor het risico op verzilting. Doordat de chloride grensvlakken niet helemaal gebiedsdekkend zijn (tekort aan data voor interpolatie), zijn er ook delen wit aangegeven waarvan bekend is dat het zout grondwater zich op grote diepte bevindt en waar dus weinig verziltingsrisico's te verwachten zijn (delen rond de randmeren) (komt overeen met de Figuur 78a en Figuur 78b).



Figuur 80: Groene gebieden geven aan dat aldaar een slechtdoorlatende laag aanwezig is boven het grensvlak (500, 1000 en 2000 ml Cl/l, respectievelijk).

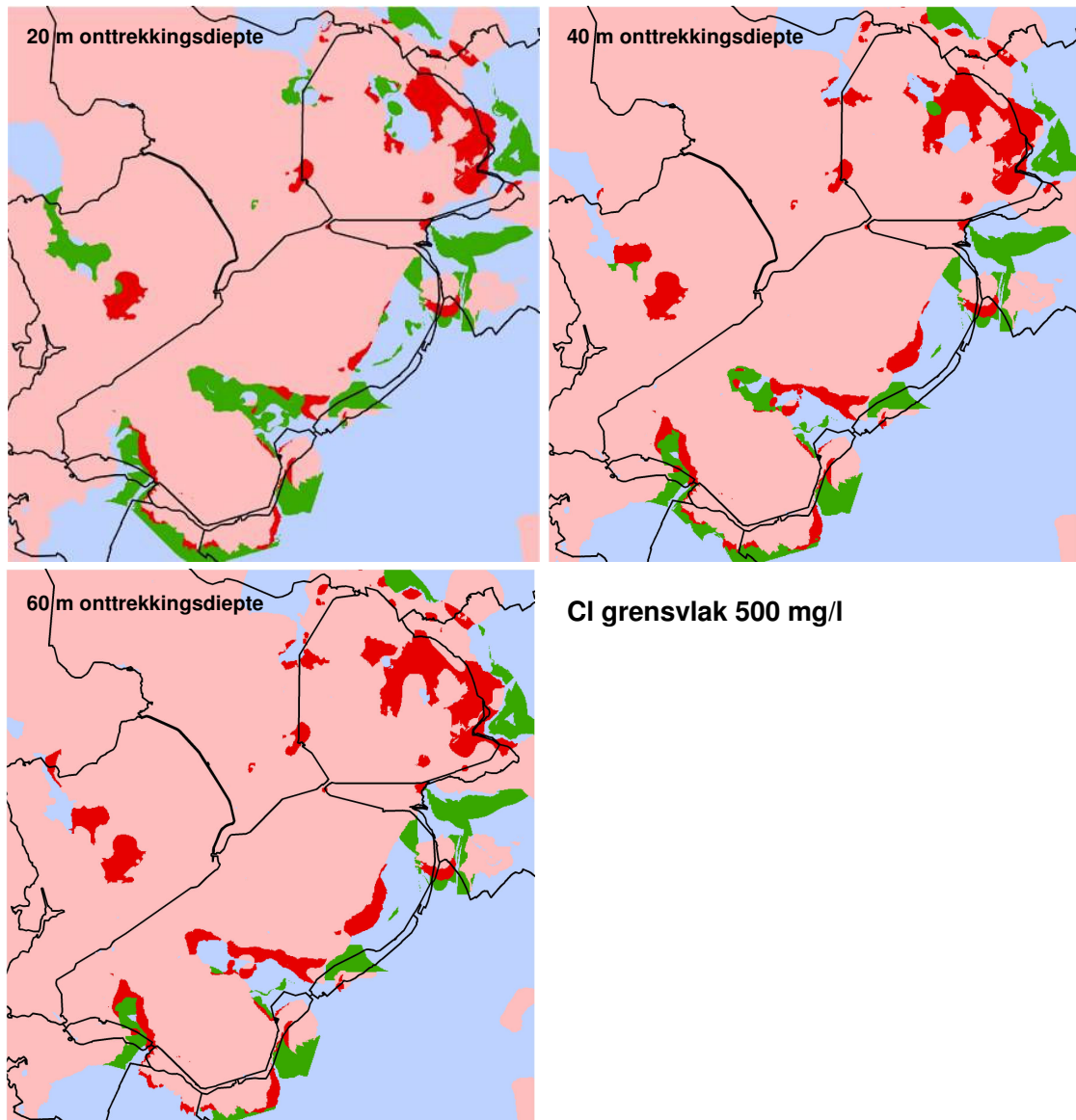


Figuur 81: Dikte van de slechtdoorlatende laag die aanwezig is boven het grensvlak (500, 1000 en 2000 ml Cl/l, respectievelijk).

8.2.3 Gebiedsdekkend gecombineerd: hoog risico en laag risico

Voor gebieden, waar minimaal één scheidende laag zich boven het chloride grensvlak bevindt, is voor verschillende onttrekkingsdiepten (20, 40 en 60m) vastgesteld waar de top van de scheidende laag zich onder betreffende onttrekkingsdiepte bevindt. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 82, Figuur 83 en Figuur 84. De delen die groen zijn weergegeven, is het verziltingsrisico laag, doordat hier een slecht doorlatende laag tussen het chloride grensvlak en de onttrekkingsdiepte zit (nogmaals: 20, 40 en 60m) (Figuur 78c, Figuur 78d en Figuur 78e). Het grootste deel van het gebied is licht rood aangegeven. Dit zijn de delen waar geen slechtdoorlatende laag boven het chloride grensvlak aanwezig is en waardoor hier dus sprake is van een hoog risico. In de delen van het gebied die in Figuur 82, Figuur 83 en Figuur 84 fel rood zijn weergegeven is er wel een slechtdoorlatende laag boven het chloride grensvlak aanwezig, alleen zit de onttrekking op deze locatie te diep (onttrekking lager dan top van slechtdoorlatende laag) waardoor er een “open” verbinding is met het zouter, dieper gelegen grondwater. Dit zijn daarom potentieel hoge risicogebieden voor de betreffende onttrekkingsdiepte. Verder zijn de delen van het gebied waar een verminderd risico te verwachten is (ondanks de afwezigheid van een scheidende laag tussen de onttrekkingsdiepte en

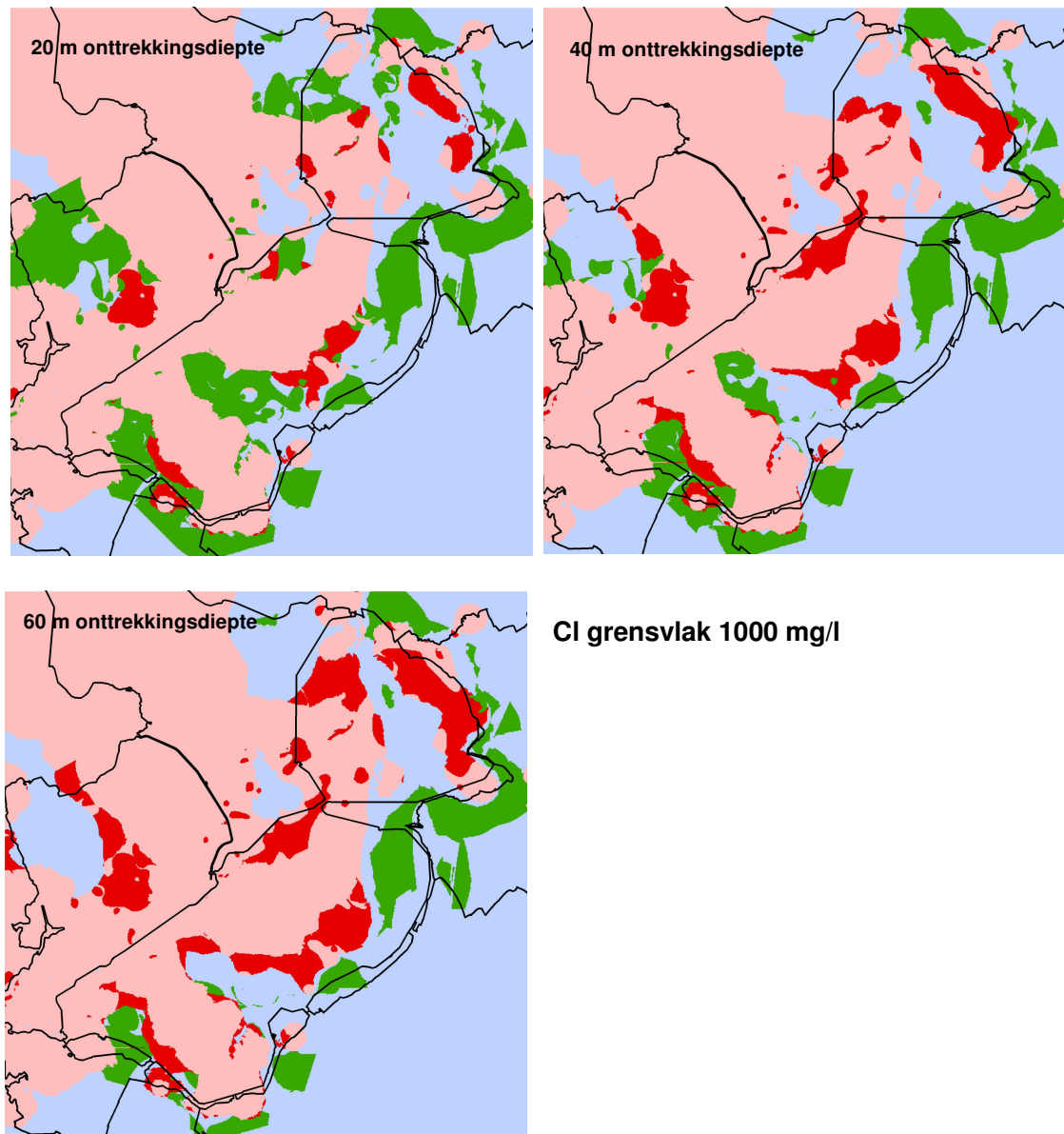
chloride grensvlak) met lichtblauw aangegeven. Dit betreffen delen waar het chloride grensvlak zich voldoende ver weg onder het onttrekkingspunt bevindt (Figuur 78b). Op basis van de resultaten van de modelstudie is vastgesteld dat enkele tientallen meters als een “veilige” afstand tussen filter en zoet-zout grensvlak kan worden beschouwd, uitgaande van een (niet te grote) onttrekkingsdebiet van 80 m³/uur (voor een hoger onttrekkingsdebiet zal een grotere afstand moeten worden gebruikt). Een vergelijking van de uitkomsten voor de verschillende onttrekkingsdiepten toont duidelijk (met name voor het grensvlak van 2000 mg/l) dat het oppervlak van de gebieden met een laag risico (groen) en verminderd risico (licht blauw) voor verzilting afneemt naarmate de onttrekkingsdiepte toeneemt. Dit is ook te verwachten, omdat het zoutgehalte toeneemt met de diepte. De diepte en pompcapaciteit van de putten in het gebied zijn weergegeven in Bijlage K.



Legenda

- hoog risico op onttrekkingsdiepte (geen sdl tussen onttrekking en brak-zout gw) (Situatie g, h)
- laag risico op onttrekkingsdiepte (wel sdl tussen onttrekking en brak-zout gw) (Situatie c, d, e)
- hoog risico algemeen (geen sdl boven brak-zout gw en afstand onttrekking en zoet-zout gw onvoldoende groot)(Situatie i)
- laag risico algemeen (geen sdl boven brak-zout gw, maar afstand onttrekking en brak-zout gw voldoende groot)(Situatie b)

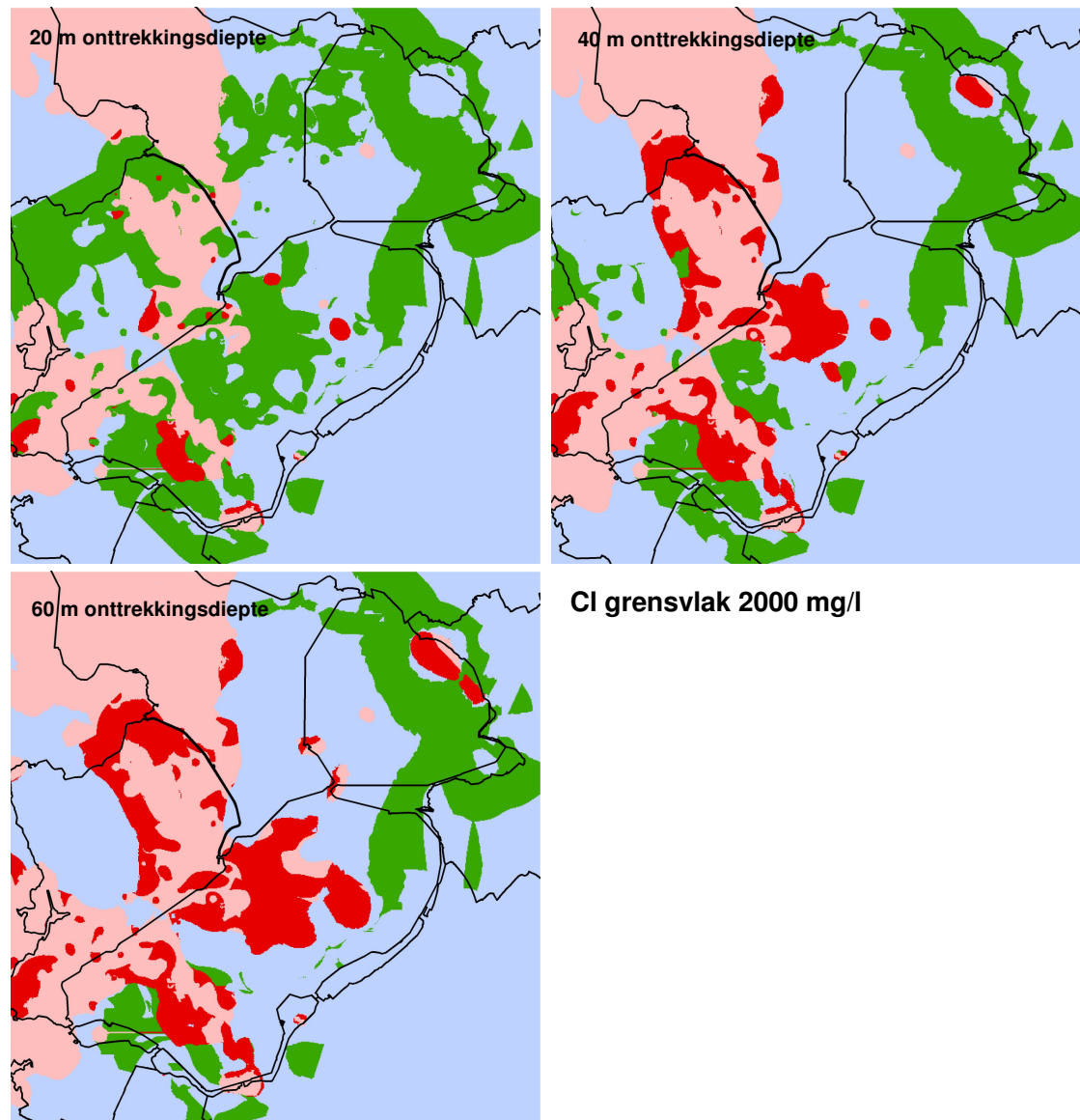
Figuur 82: Risico-analyse uitgaande van chloridegrensvlak van 500 mg/l voor onttrekkingsdiepte van 20, 40 en 60 m.



Legenda

- hoog risico op onttrekkingsdiepte (geen sdl tussen onttrekking en brak-zout gw) (Situatie g, h)
- laag risico op onttrekkingsdiepte (wel sdl tussen onttrekking en brak-zout gw) (Situatie c, d, e)
- hoog risico algemeen (geen sdl boven brak-zout gw en afstand onttrekking en zoet-zout gw onvoldoende groot) (Situatie i)
- laag risico algemeen (geen sdl boven brak-zout gw, maar afstand onttrekking en brak-zout gw voldoende groot) (Situatie b)

Figuur 83: Risico-analyse uitgaande van chloridegrensvlak van 1000 mg/l voor onttrekkingsdiepte van 20, 40 en 60 m.



Legenda

- hoog risico op onttrekkingsdiepte (geen sdl tussen onttrekking en brak-zout gw) (Situatie g, h)
- laag risico op onttrekkingsdiepte (wel sdl tussen onttrekking en brak-zout gw) (Situatie c, d, e)
- hoog risico algemeen (geen sdl boven brak-zout gw en afstand onttrekking en zoet-zout gw onvoldoende groot) (Situatie i)
- laag risico algemeen (geen sdl boven brak-zout gw, maar afstand onttrekking en brak-zout gw voldoende groot) (Situatie b)

Figuur 84: Risico-analyse uitgaande van chloridegrensvlak van 2000 mg/l voor onttrekkingsdiepte van 20, 40 en 60 m.

9 Conclusies

In deze Zoet-zout Studie Provincie Flevoland heeft integratie van een inventarisatie van chloride concentratie metingen, een watersysteem analyse, een 3D zoet-zout kartering, een meetcampagne en analytische en numerieke modelleringen geleid tot meer inzicht in de effecten van grondwateronttrekkingen voor een duurzaam zoet grondwaterbeheer, uitmondend in risico kaarten bij verschillende onttrekkingsdiepten.

De conclusies van dit onderzoek zullen hieronder aan de hand van gedefinieerde kernvragen nader worden behandeld:

1. Waar zijn winbare zoete grondwatervoorraden?

Los van de bekende grote zoete grondwatervoorraden in het diepe derde watervoerend pakket in Zuidelijk Flevoland (onder de kleilagen van het glaciale bekken) die gebruikt worden door Vitens voor de drinkwaterwinning bevinden zich winbare ondiepe zoete grondwatervoorraden bij de randmeren en ten zuidoosten van de Oostvaarderplassen. De aanwezigheid van deze laatstgenoemde grote zoetwatervoorraad is te verklaren door het feit dat hier in het verleden nauwelijks infiltratie van zeewater heeft plaatsgevonden door de aanwezigheid van hoogveen. In de Noordoostpolder bevindt zich nog al op zo'n 15 meter diepte brak tot zoet grondwater ($> 300 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$), met name onder de driehoek Emmeloord-Urk-Espel en op de provinciegrens met Friesland en Overijssel; de zoutgehalten zijn echter met de diepte lager dan de zoutgehalten op dezelfde diepte bij Almere en Lelystad/Dronten (hoofdstuk 3).

2. Hoe zijn deze voorraden ontstaan, en hoe worden de voorraden aangevuld?

De transgressies gedurende het Holocene (laatste 10.000 jaar), en niet de transgressies van het Pleistoceen, hebben ervoor gezorgd dat de Provincie Flevoland momenteel veel brak en zout grondwater bevat. Brak tot zout grondwater in de bovenste 200 meter van de Provincie Flevoland is zeer waarschijnlijk volledig toe te schrijven aan de transgressies van het vroeg-Holocene (~ 5000 jaar geleden), toen er nog nauwelijks een weerstandsbiedende slechtdoorlatende deklaag was ontwikkeld. Aan de hand van dwarsprofielen in de Flevopolders is een duidelijke relatie aangetoond tussen de chloride concentratie verdeling in de ondergrond en de aanwezigheid van scheidende kleilagen.

Infiltratie van brak tot zout water kon eenvoudig plaatsvinden; dit proces werd nog eens versneld door dichtheidseffecten, vooral in de getijdengeulen. Het zoute water dat infiltreerde varieerde met locatie en tijd in zoutgehalte door verdunning als gevolg van de aanwezigheid van de monding van verschillende beken en/of rivieren (hoofdstukken 2 en 3).

Omdat de hoger gelegen delen bedekt waren met hoogveen was daar verzilting afwezig en kon zich zodoende een grote voorraad zoet grondwater ontwikkelen; met name bij de randmeren en Zuidelijk Flevoland (derde watervoerend pakket, onder de kleilagen van het glaciale bekken). Buiten deze gebieden komt zoet grondwater (kleiner dan $150 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$) nauwelijks voor, zodat de gebruikte klasseindeling van Stuyfzand eigenlijk niet volledig is (hoofdstuk 5).

3. Hoe ontwikkelen de voorraden zich (verzoeting/verzilting)?

De chloride concentratie in de ondergrond van de Provincie Flevoland blijkt een grote variatie te hebben in ruimte en diepte, maar veel minder in de tijd (hoofdstuk 5). Er treedt verzoeting op in meerdere gebieden van de Provincie Flevoland, vooral in de bovenste 20 meter in het noordwestelijk deel van de Noordoostpolder, het westelijk deel van Zuidelijk Flevoland en de toch al redelijk zoete randmeren.

De kwelgebieden (langs randen en in grote vaarten en tochten) en infiltratiegebieden (daar waar vaarten insnijden en scheidende lagen op diepte ontbreken) bepalen indirect in hoeverre de zoete grondwatervoorraden in de watervoerende pakketten zich ontwikkelen. Omdat transport in de ondergrond van zouten (chloride) een traag proces is (in de orde van meters per jaar), zijn de veranderingen in de voorraad niet snel zichtbaar. Pas op een tijdsperiode van minstens enkele tientallen jaren zal in de infiltratiegebieden echter de aanvulling van zoet grondwater substantieel kunnen zijn. Sinds de inpoldering wordt zeer lokaal bij de randen van de IJsselmeerpolders een sterke kwelflux gegeneerd, terwijl in het centrale deel van Flevoland en overgrote deel van de Noordoostpolder infiltratie dominant is. De infiltratie vindt voornamelijk plaats als vaarten insnijden en scheidende lagen op diepte ontbreken (Oostelijk Flevoland, Noordoostpolder, maar niet Zuidelijk Flevoland). Verder valt op dat in alle grote vaarten kwel optreedt; dus ook in de infiltratiegebieden. Daar waar de watergangen de deklaag doorsnijden kan infiltrerend neerslag/oppervlaktewater tot diep in de ondergrond stromen (hoofdstuk 4).

Uit de meetcampagne in het detailgebied rondom Espel, Noordoostpolder, komt naar voren dat er vooralsnog geen bewijs is gevonden dat het grondwater door de dijkse kwel vanuit het IJsselmeer verzoet (hoofdstuk 6).

4. Hoe kunnen de voorraden duurzaam worden geëxploiteerd?

Om de zoetwatervoorraden duurzaam te exploiteren moet er duidelijkheid zijn over de afstand van brak en zout grondwater tot de onttrekkingsput, de aanwezigheid zoet-zout inversies, de hoedanigheid van slechtdoorlatende lagen (verspreiding, diepteligging en dikte), en condities van de onttrekking (filterlocatie, debiet en regime). Tevens is het belangrijk te weten welke chloride concentratie van het onttrokken grondwater nog acceptabel is en waarvoor het gebruikt gaat worden.

Zo geeft de numerieke modellering van zoet, brak en zout grondwater duidelijk aan dat de afstand tot brak-zout grondwater de belangrijkste factor is voor de verzilting in de onttrekkingsput (hoofdstuk 7). Hoe zouter het grondwater hoe meer zout in de onttrekking terecht zal komen. De initiële chloride concentratie verdeling heeft een grote invloed op de chloride concentratie in de onttrekking voor alle onttrekkingstypes (berekening ondiep, berekening diep, boerencluster en bronbemaling), behalve bij WKO. Een nauwkeurige kartering van de huidige zoet-brak-zout verdeling op regionale schaal is uitgevoerd in deze studie. Voor de locale schaal, viz. rondom individuele onttrekkingsputten, wordt echter aanbevolen een gedetailleerde kartering uit te voeren, eventueel in combinatie met aanvullende metingen en een numerieke modellering van de specifieke hydrogeologische omstandigheden, om de mogelijke verplaatsing van de zoet-brak-zout verdeling onder invloed van autonome processen (naijleffect inpoldering Flevopolders en grote grondwateronttrekkingen) op de middellange termijn te kunnen bepalen.

De vele ondiepe kleine grondwateronttrekkingen zullen slechts voornamelijk lokaal ter plaatse van de onttrekking verzilting van het grondwatersysteem veroorzaken door

opkegeling van brak tot zout grondwater. Van een regionale vermindering van de totale zoetwatervoorraad in de Provincie Flevoland lijkt geen sprake te zijn. In infiltratiegebieden is de verwachting dat de zoetwatervoorraad enigszins groeien, zij het langzaam.

Daarnaast geeft de numerieke modellering aan dat er verzoeting optreedt indien de onttrekking plaatsvindt boven de slechtdoorlatende laag. Relatief zoet oppervlaktewater kan hierdoor gemakkelijk naar de onttrekking toestromen, terwijl het brakke tot zoute grondwater door de scheidende laag op afstand wordt gehouden. Een cluster van onttrekkingen boven de slechtdoorlatende laag heeft bovendien een versterkend effect op de verzoeting. Verzilting treedt op indien de onttrekking plaatsvindt onder de slechtdoorlatende laag en het zoute grensvlak dientengevolge niet ver weg ligt. Hoe hoger de weerstand van de slechtdoorlatende laag, hoe meer het bovenstaande proces (resp. verzoeting of verzilting in de onttrekking) wordt versterkt.

Hoe groter het debiet van de onttrekking hoe sneller chloride concentratie normen worden overschreden. Een continue laag debiet is beter dan een kortstondig hoog debiet. Voor onttrekkingen van korte duur (type bronbemaling) herstelt het grondwatersysteem zich binnen 30 jaar, terwijl onttrekkingstype warmte-koude opslag bijna geen invloed lijkt te hebben op de chloride concentratie verdeling.

Risico kaarten zijn ontwikkeld voor drie verschillende chloride concentratie limieten (500, 1000 en 2000 mg Cl⁻/l) en voor drie verschillende onttrekkingsdiepten (-20, -40 en -60 m N.A.P.). Uit de analyse (hoofdstuk 8) blijkt dat voor het grensvlak van 500 mg/l er in totaal 85% van de bestaande putten behoren tot de categorie "Potentieel hoog risico" en slechts 14% tot "laag risico", terwijl dit voor het grensvlak van 2000 mg/l respectievelijk 44% en 56% is (bijna een halvering in % putten met potentieel hoog risico).

5. Hoe kan de opgedane kennis goed worden ontsloten voor gebruikers?

Deze studie vormt samen met een kwetsbaarheidstudie voor verontreinigingen van het grondwatersysteem van Grontmij de basis voor het politiek-maatschappelijke proces in het kader van de omgevingsplanherziening 2009.

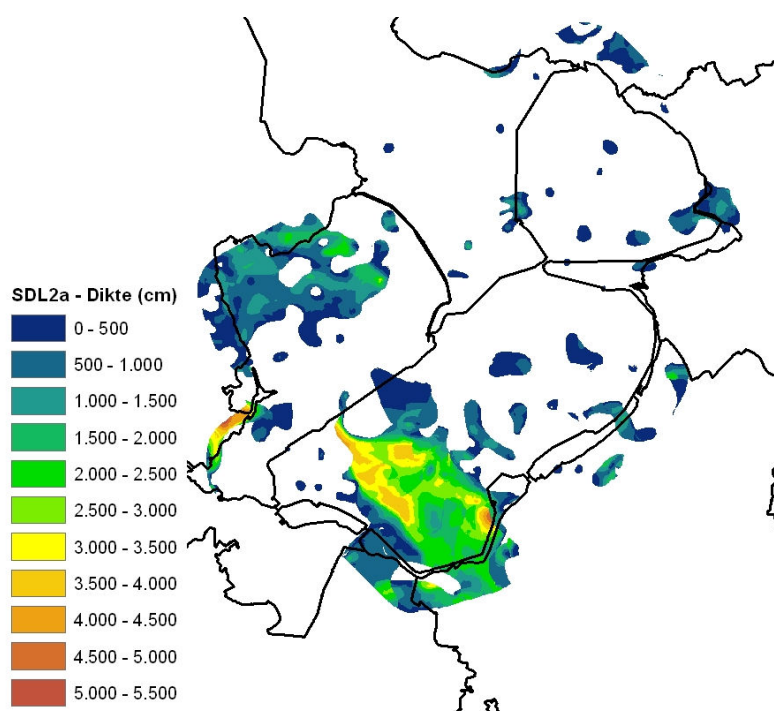
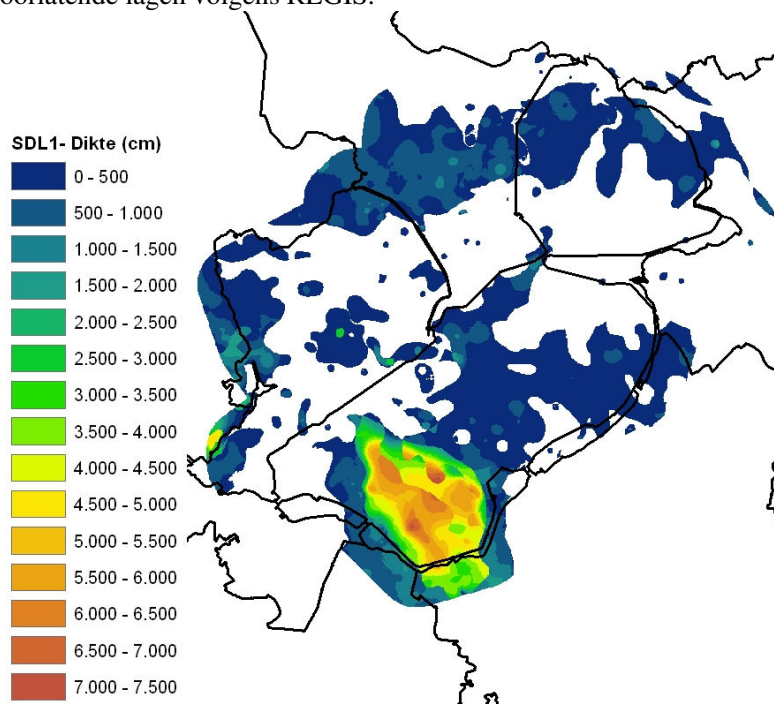
Tevens zal de 3D chloride concentratie verdeling, waarvan de constructie in hoofdstuk 5 is beschreven, voor specifieke gebruikers gesteld worden. De meetresultaten (hoofdstuk 6) worden besproken tijdens een bijeenkomst met de deelnemende agrariërs in het veldwerkgebied in de Noordoostpolder nabij Espel. Naast uitwisseling van kennis en ervaring zal dit onderhavige rapport worden uitgereikt. Bovendien zijn de gridbestanden beschikbaar voor de Provincie voor verdere bewerking. Tenslotte zal deze studie in korte vorm verschijnen in een populair wetenschappelijk tijdschrift.

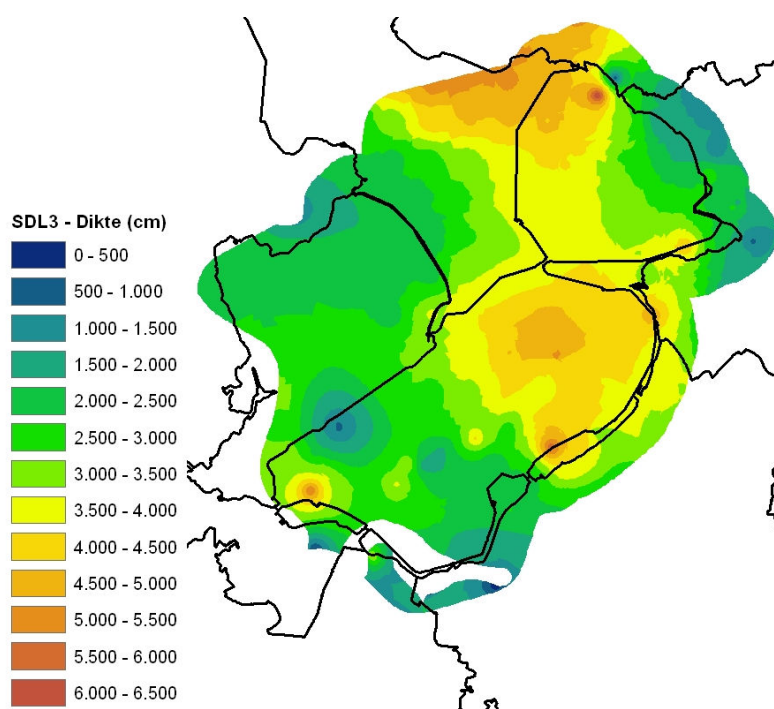
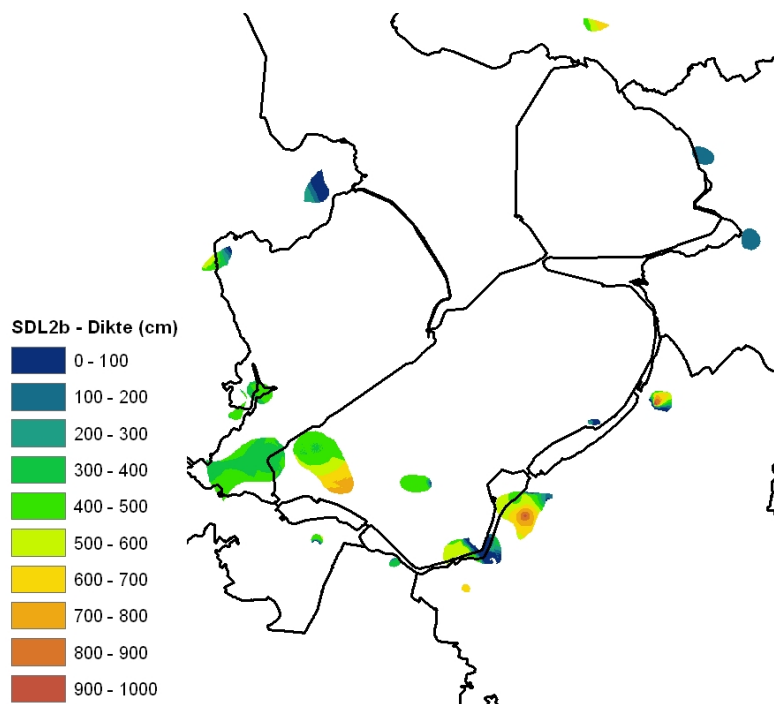
10 Literatuur

- Artesia/DHV, 2004, Winning van zoet grondwater in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland, Onderbouwing voor onttrekkingsplafonds voor de openbare drinkwaterwinning, p. 121.
- Bear, J. & G. Dagan, 1964, Some exact solutions of interface problems by means of the hodograph method, *J. Geophys. Res.*, 69, 1563-1572.
- Dagan, G. & J. Bear, 1968, Solving the problem of local interface upconing in a coastal aquifer by the method of small perturbations, *J. Hydraul. Res.*, 6, 15-44.
- Dam, van, J.C., 1988, College dictaat Hydrogeologie.
- Geirnaert, W. en J. Vandenberghe, Applied geophysics for groundwater exploration and geological mapping. Instituut voor Aardwetenschappen, VU Amsterdam, 1988.
- Haskoning, 2003, Rapportage meetnet grondwaterkwaliteit Provincie Flevoland 1937-2003, 45 p + 13 bijlagen.
- Kloosterman, F.H., 2007, Kartering zoet/brak/zout verdeling Nederland; Beschrijving van de ZZ-REGIS software suite. Concept TNO-rapport.
- Kruseman, G.P. en N.A. de Ridder, Analysis and evaluation of pumping test data; ILRI, Wageningen, 1970.
- Meinardi, C. R. (1973), Het zoutwatervoorkomen in de ondergrond van de lage gedeelten van Nederland, (in Dutch), *H2O* 6(18): 454-460.
- Overmeeren, R.A. van, M.H. Mulder and J.A.C. Meekes, Computer aided analysis and interpretation of geophysical data. TNO Institute of Applied Geoscience, 1991.
- Oude Essink, Density Dependent Groundwater Flow; Salt Water Intrusion and Heat Transport, Lecture notes Utrecht University, Earth Sciences, Theoretical Geophysics, 2001.
- Oude Essink, G.H.P., Houtman, H. & B.J.M. Goes, 2005, Chloride-concentratie onderkant deklaag in Nederland, NITG 05-056-A, 17 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Post, V.E.A., 2004, Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. The Netherlands, Ph.D.studie Vrije Universiteit: p. 138.
- Schmorak, S. & Mercado, A., Upconing of fresh-water sea-water interface below pumping wells, field study, *Water Resour. Res.*, 5, 1290-1311, 1969.
- Stuyfzand, P., Hydrochemistry and hydrology of costal dunes of the Western Netherlands, Vrije Universiteit, Amsterdam, 1993.
- TNO, Inleiding in geofysisch boorgatmeten, een praktische cursus voor grondwater onderzoek, 1992.
- Wirdum, G. van, Investigation into the direction and magnitude of water through peat at Thorne Moors, UK. TNO rapport, 2004.

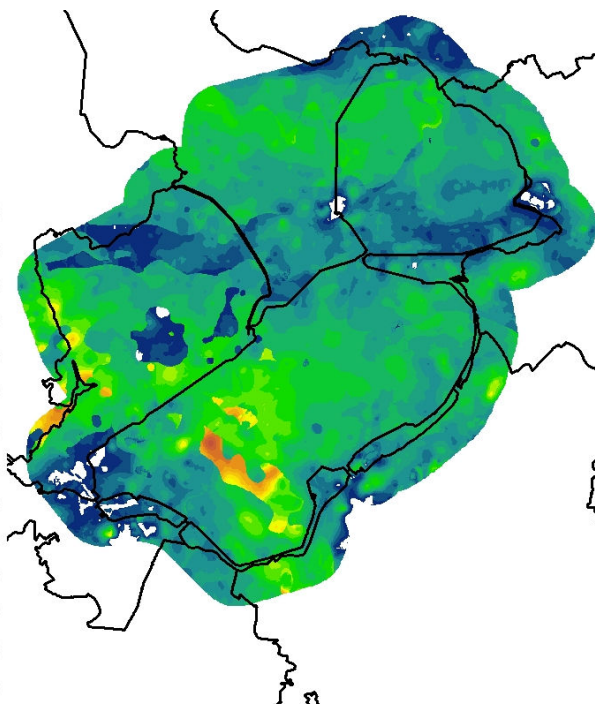
A Dikte en verbreiding WVP en SLD volgens REGIS

Hieronder volgen de dikte en verbreiding van verschillende watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen volgens REGIS.

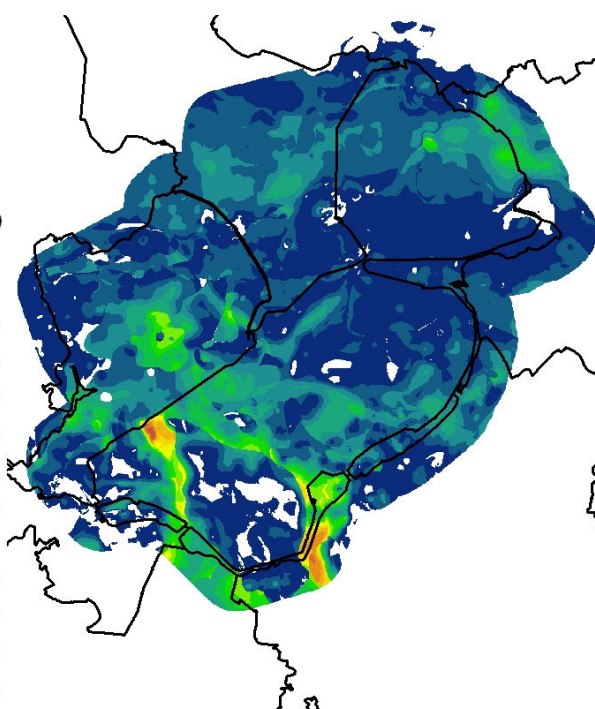


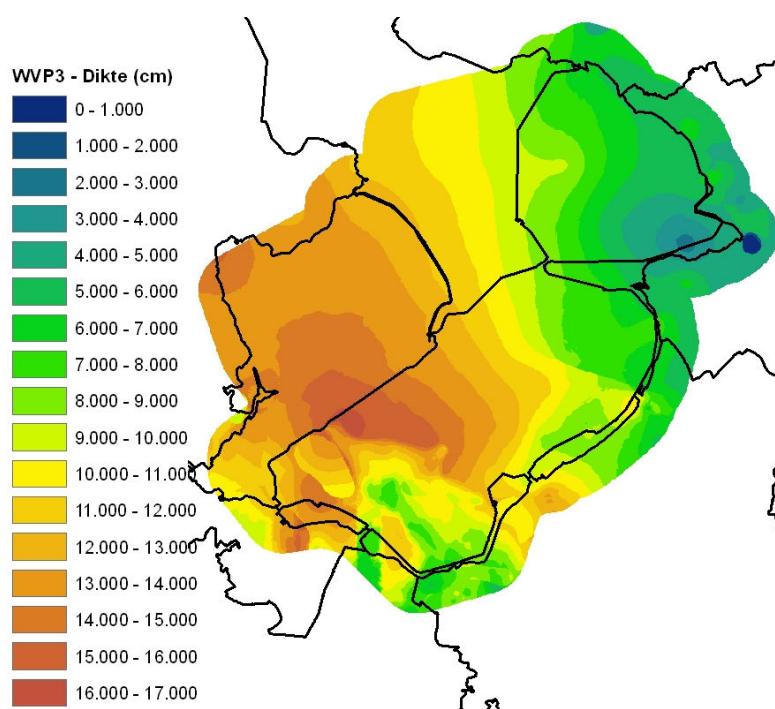
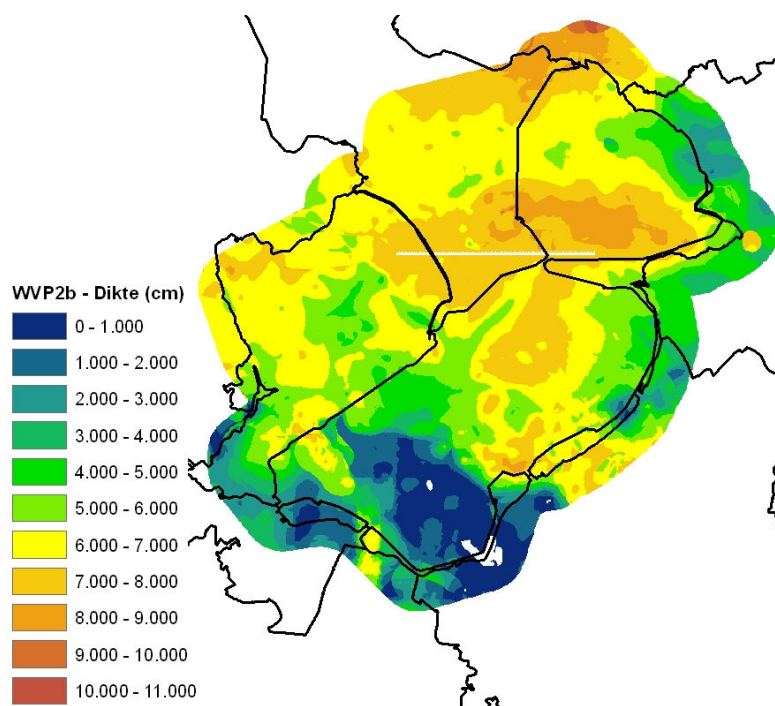


WVP1- Dikte (cm)

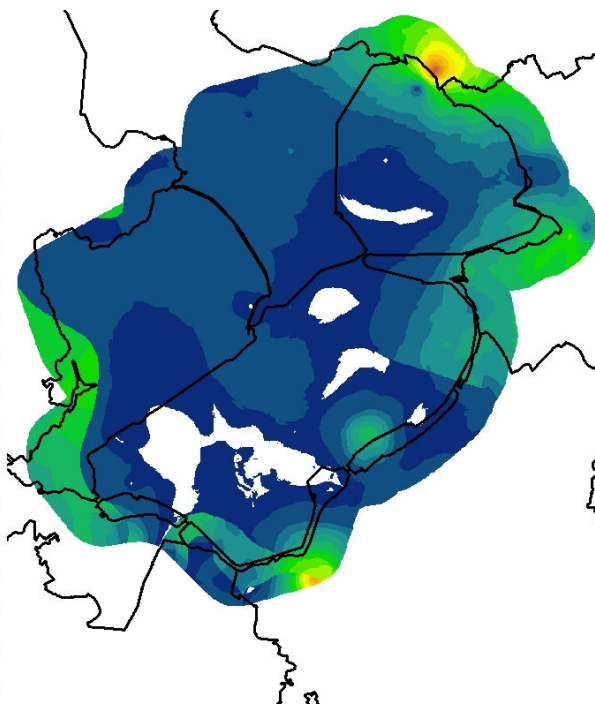


WVP2a - Dikte (cm)

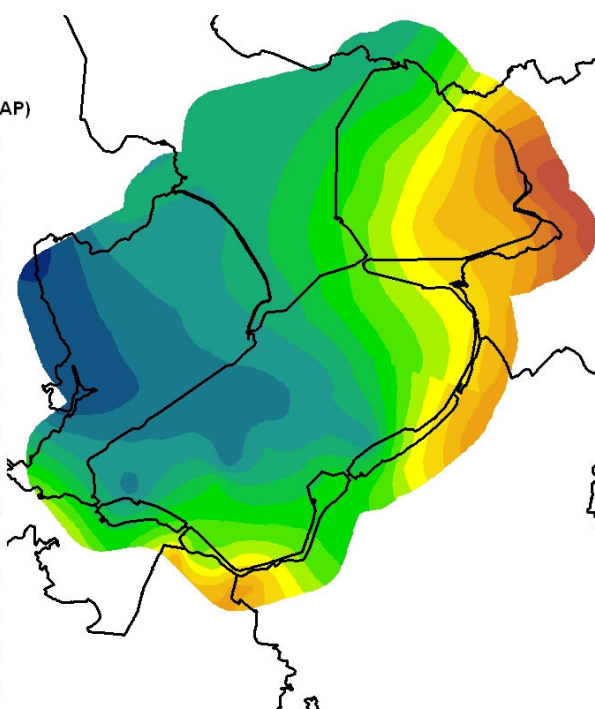




WVP4 - Dikte (cm)



GHB - Top (cm t.o.v. NAP)



B Analyse verzoeting en verzilting grondwater in Flevoland

Uitvoering

Aan de hand van chloride concentraties wordt de verzilting en verzoeting van de desbetreffende observatiepunten bepaald. Er worden hierbij twee verzoeting/verzilting analyse methoden toegepast: chemische analyse van kationuitwisselingsprocessen en chloride concentratie meetreeksen.

Gegevens

De gegevens voor de analyse van verzoeting en verzilting in grondwater zijn grotendeels afkomstig uit de DINO-database van TNO. De database omvat een verzameling van verschillende projecten waarbij de landelijke en provinciale meetnetten het grootste aandeel hebben. De analysegegevens uit de database zijn voor een eerder project omgezet naar meerdere excelbestanden met onderscheid in chloridegegevens en een uitgebreidere analyse van de grondwatermonsters, vooral van belang voor de analyse van de kationuitwisselingsprocessen (focus op natrium, kalium, calcium en magnesium). Aan de hand van x-y coördinaten zijn uit deze bestanden de grondwatergegevens van de Provincie Flevoland gefilterd. De bestanden zijn bijgehouden tot 1998. Nieuwere analyses van chloride en kationen zijn aangevuld vanuit een additioneel bestand van de landelijke en provinciale meetnetten.

In totaal zijn er 2809 chloridemetingen verzameld afkomstig van 835 grondwaterputten in de periode 1915-2005. Voor de kationuitwisseling zijn er minder gegevens aanwezig doordat deze bepaling niet voor alle grondwatermonsters wordt uitgevoerd. De uitwerking van de kationuitwisseling zal zich vooral richten op natrium en omvat 865 analyses afkomstig van 220 grondwaterputten in de periode 1970-2005. De grondwaterputten met natriumgegevens komen ook terug bij de chloridegegevens waarmee locaties 1 op 1 vergeleken kunnen worden.

De gegevens zijn vervolgens verdeeld in 4 verschillende diepte- en tijdsklassen om beter inzicht te krijgen in de variatie van de chloride concentratie en de verandering in verzoeting in verzilting. Dit betekent dat er per parameter (chloride concentratie, tijdreeks chloride en kation-uitwisseling) 16 verschillende kaarten gemaakt kunnen worden. Bij de indeling van de diepte- en tijdsklassen is geprobeerd om de grootte van de klassen min of meer gelijk te maken. De volgende indeling is gemaakt:

Tabel B1 Klassenindeling in tijd van chloride- en natriumanalyses in grondwaterputten van de Provincie Flevoland

Klasse	Tijd	Aantal monsters met chlorideanalyse	Aantal monsters met natriumanalyse
1	1915-1965	835	0
2	1965-1975	680	141
3	1975-1985	755	418
4	1985-2005	539	306

Tabel B2 Klassenindeling in diepte van chloride- en natriumanalyses in grondwaterputten van de Provincie Flevoland

Klasse	Diepte (cm)	Aantal monsters met chlorideanalyse	Aantal monsters met natriumanalyse
1	0-2000	857	283
2	2000-4000	1029	383
3	4000-6000	610	193
4	> 6000	313	6

De natriumanalyses zijn niet geheel gelijkmatig verdeeld over de klassen. Dit wordt mede veroorzaakt door de beperkte periode waarin de analyses zijn uitgevoerd en de beperkte spreiding in diepte.

De resultaten voor de verzoeting/verziltig analyse worden ruimtelijk gepresenteerd aan de hand van GIS-kaarten en vervolgens bediscussieerd. De resultaten zijn verdeeld in drie onderdelen: 1) chloride concentraties; 2) tijdreeksen chloride; 3) kationuitwisseling met natrium. De uitkomsten van onderdeel 2 en 3 worden daarnaast ook met elkaar vergeleken ter controle van de methoden en om verschillen en overeenkomsten te constateren. Bij de chloride concentraties en tijdreeksen van chloride worden tevens diepteprofielen gegeven van de chloride concentraties voor extra toelichting op de geconstateerde variatie.

Resultaten

Chloride concentraties

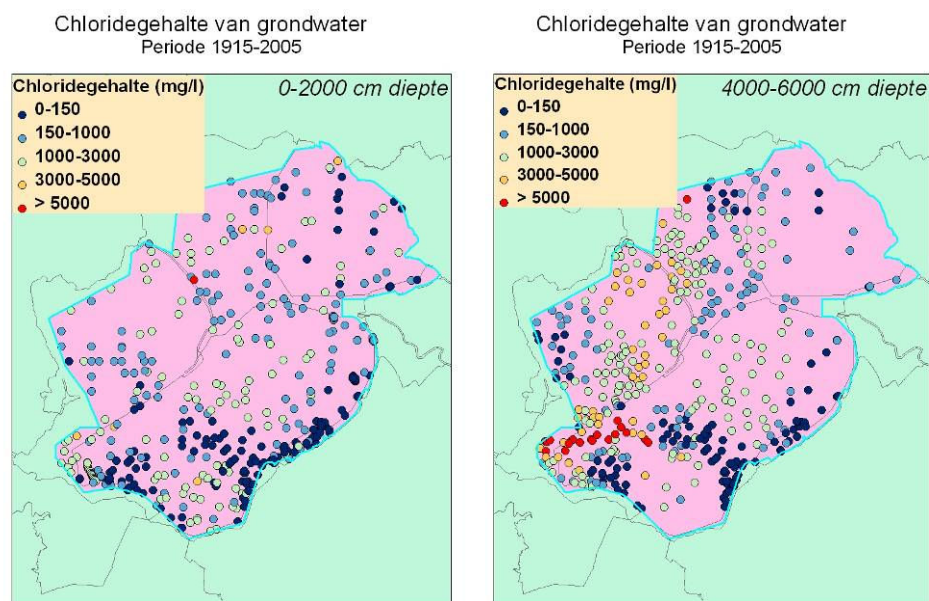
Om de variatie in chloride concentratie goed te kunnen beoordelen, wordt er ook voor chloride een verdere indeling in klassen gemaakt. Overgangen van zoet naar zout zijn hiermee beter te traceren, daarom wordt naast een indeling in chloride concentratie ook per klasse een omschrijving gegeven. De indeling ziet er als volgt uit:

Tabel B3 Klassenindeling van de chloride concentratie in grondwaterputten van de Provincie Flevoland

Klasse	Chloride conc. (mg/l)	Omschrijving	Aantal monsters in klasse
1	< 150	Zoet	947
2	150-1000	Brak	949
3	1000-3000	Matig zout	725
4	3000-5000	Zout	137
5	> 5000	Zeer zout	51

Uit tabel B3 komt duidelijk naar voren dat het grootste deel van de grondwatermonsters zoet of brak zijn. Voor een ruimtelijke variatie van de chloride concentraties wordt verwezen naar Figuur B1a en b. Hierin is de chloride concentratie ruimtelijk uitgezet voor twee verschillende diepteklassen (< 2000 cm en 4000-6000 cm) in de periode 1915-2005 (alle tijdsklassen zijn bij elkaar gezet). De chloride concentraties zijn op deze manier weergegeven doordat de grootste variatie vooral in de diepte voorkomt. Variatie van de chloride concentratie met de tijd is over het algemeen klein en blijft grotendeels binnen de klasse (bijvoorbeeld gehalte neemt af van 1900 mg/l naar 1200 mg/l in 10 jaar tijd, variatie is groot, maar blijft wel binnen de vastgestelde klasse van matig zout) of schuift slechts 1 klasse op (van brak naar matig zout). Grote variatie van zoet naar

zout of vice versa is niet duidelijk terug te vinden met de variatie van de chloride concentratie in de tijd.

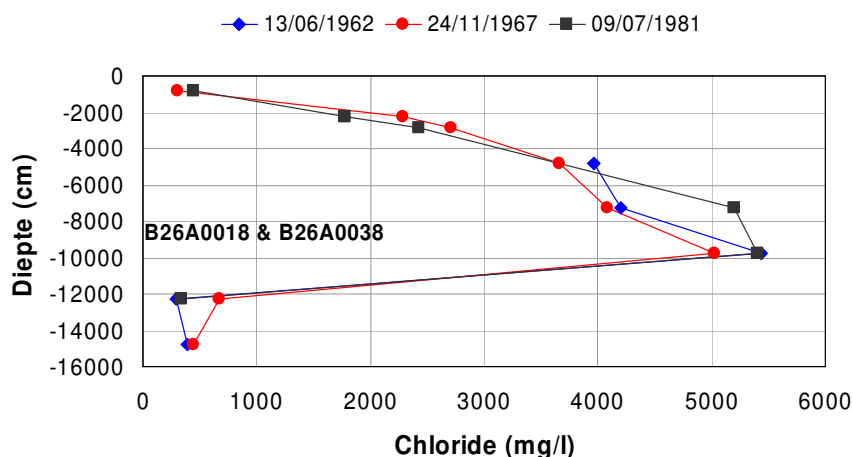


Figuur B1 Ruimtelijke verdeling van de chloride concentratie in de periode 1915-2005 in de Provincie Flevoland onderverdeeld in chlorideklassen volgens tabel B3 op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b).

Figuur B1a en b laten duidelijk ruimtelijke verschillen zien in chloride concentratie. Zoet grondwater komt in de hele provincie voor maar clusterd zich vooral bij de randmeren (tussen Flevoland en Gelderland en Flevoland en Noord-Holland, onder Almere) met een uitloper tussen Almere en Lelystad en enkele locaties in de Noordoostpolder. De Noordoostpolder heeft echter een lage dichtheid aan gegevens waardoor het moeilijk is om dit gebied goed te beschouwen. Op een diepte tot 2000 cm (Figuur B1a) komen nauwelijks zout tot zeer zoute monsters voor. Het IJsselmeer is grotendeels brak tot matig zout en dit geldt ook voor het gebied rond Lelystad, Dronten en westelijk van Almere. Op een diepte van 4000 tot 6000 cm (Figuur B1b) zijn duidelijk meer zoute gebieden. Een vergelijking van Figuur B1a en b laat duidelijk de verschillen zien in chloride concentratie tussen de twee verschillende diepteklassen. Het IJsselmeer verandert van brak tot matig zout naar matig zout tot zout vooral in de middenstrook van het meer ter hoogte van de Oostvaardersplassen en een deel van Almere. De grootste veranderingen treden op in een strook nabij Almere waarbij het grondwater verandert met de diepte van brak tot matig zout naar zout tot zeer zout. Figuur B2 geeft een voorbeeld van de variatie in chloride concentratie met diepte in de buurt van Almere ($x = 114210$; $y = 492540$). Hierin is duidelijk te zien dat de chloride concentratie toeneemt van ongeveer 300 mg/l (brak) op een diepte van 1000 cm naar een gehalte ruim boven de 5000 mg/l op een diepte van 10000 cm. Hierna neemt de chloride concentratie snel af naar brakke waarden.

De variatie van de chloride concentratie met de tijd is zeer wisselvallig. Het meest ondiepe punt laat een kleine verzilting zien (toename van chloride concentratie met tijd), terwijl er een sterkere verzoeting optreedt op een diepte van 2000 tot 6000 cm. Vervolgens is er een sterke verzilting op een diepte van 7000 tot 10000 cm. Wat bij deze veranderingen opvalt is dat, ondanks de duidelijke toe- of afname van de chloride concentratie met de tijd, er nauwelijks verschuivingen optreden naar een andere

chlorideklasse. Alleen het filterpunt op een diepte van ongeveer 7000 cm verschuift van zout tot zeer zout.



Figuur B2 Diepte-profiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de gecombineerde grondwaterput B26A0018 & B26A0038.

De verschillen van de chloride concentratie met de tijd kunnen het beste beschouwd worden met de tijdreeksen van chloride.

Tijdreeksen chloride

Uit het totaalbestand met chloride concentratie metingen zijn de bruikbare tijdreeksen geselecteerd waarbij een grondwaterput op een bepaalde diepte (bepaalde filter) op meerdere tijdstippen geanalyseerd moet zijn op chloride. Dit levert een grote variatie op in tijdreeksen waarbij sommige locaties meerdere keren zijn bemonsterd voor verschillende filters terwijl andere locaties slechts twee keer zijn gemeten op 1 diepte. Deze gegevens zijn samengenomen in een nieuw excelbestand met in totaal 910 chloridemetingen op ongeveer 157 locaties. De tijdreeksen in chloride worden uitgedrukt in dCl/dt (verandering in chloride concentratie met verandering in tijd). Tijd is hierbij uitgedrukt in dagen. Voor een inschatting van de mate in verandering zijn dCl/dt berekeningen onderverdeeld in klassen. Deze indeling is redelijk arbitrair maar geeft toch een redelijke inschatting van de verdeling.

Tabel B4 Klassenindeling van de verandering in chloride concentratie met de tijd (dCl/dt) voor de bepaling van verzoeting en verzilting in grondwaterputten van de Provincie Flevoland

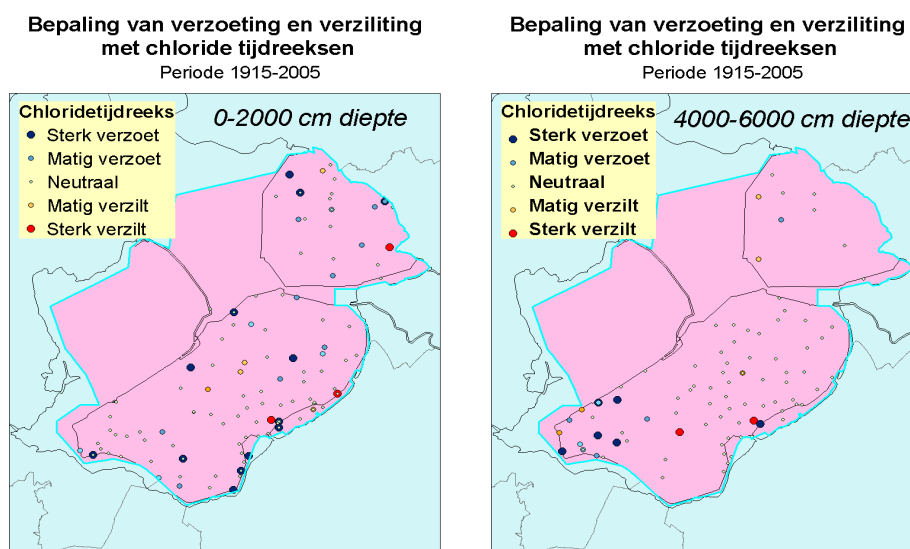
Klasse	$dCl/dt \cdot 1000$ (mg/l/dag)	Omschrijving	Aantal monsters in klasse	Aantal monsters in klasse na selectie (zie tekst)
1	< -100	Sterke verzoeting	99	43
2	-100 tot -50	Matige verzoeting	67	44
3	-50 tot 50	Neutraal	623	395
4	50 tot 100	Matige verzilting	43	21
5	> 100	Sterke verzilting	78	17

De veranderingen in chloride concentratie met de tijd in tabel B4 zijn vermenigvuldigd met 1000 doordat de eenheid mg/l/dag anders zeer lage waarden zal geven. Voor een betere indicatie van de veranderingen kunnen de grenzen ook uitgedrukt worden per

jaar en dit komt neer op 20 mg/l/jaar voor een grens van -20 of 20 mg/Cl/dag en 40 mg/l/jaar voor een grens van -100 of 100 mg/Cl/jaar.

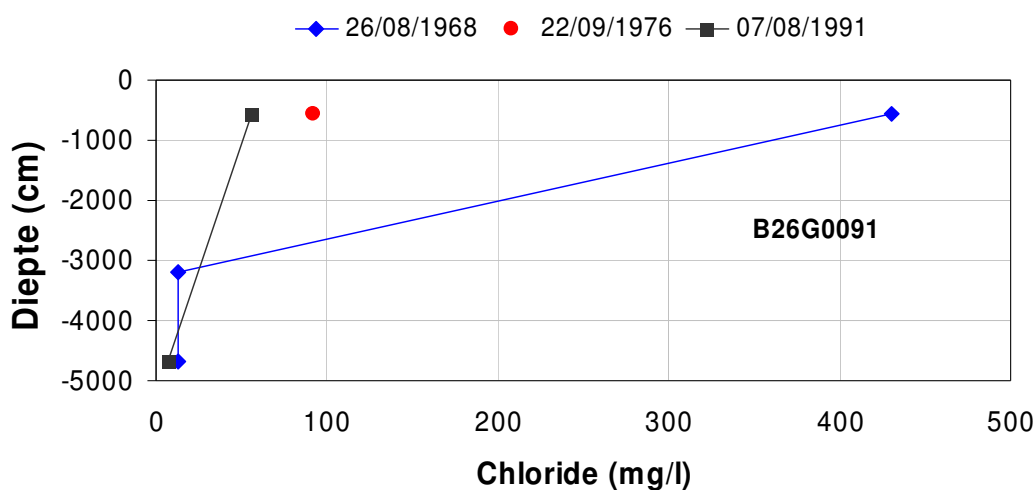
De verzoetings- en verziltingsprocessen kunnen het beste op een langere tijdsschaal beschouwd worden zodat er een beter beeld ontstaat van de lange termijnveranderingen en er minder invloed is van tijdelijke fluctuaties. Daarom worden alleen de gegevens meegenomen waarbij de verandering in de tijd meer dan twee jaar bedraagt. Hiermee is de selectie geslonken naar 520 chloride concentratie metingen.

Uit tabel B4 blijkt dat het grootste deel van de tijdreeksen neutraal zijn. Dit betekent niet dat er geen verzoeting of verzilting optreedt, maar dat de veranderingen die optreden minimaal zijn en op lange termijn geen grote invloed hebben op de processen. Figuur B3a en b illustreren de variatie in verzoeting en verzilting aan de hand van chloride tijdreeksen in de periode 1915-2005 bij twee verschillende diepteklassen (< 2000 cm en 4000-6000 cm). Deze tijdreeksen kaarten zijn vergelijkbaar met de ruimtelijke variatie van de chloride concentratie van Figuur B1a en b, waarbij ook nu de grootste verschillen optreden tussen deze twee diepteklassen.



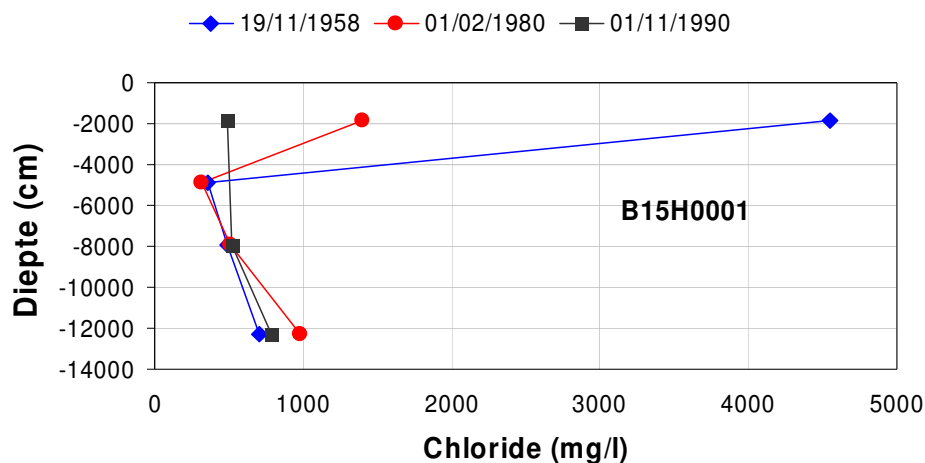
Figuur B3 Ruimtelijke verdeling van de tijdreeksen chloride voor de bepaling van verzoeting en verzilting voor de periode 1915-2005 in de Provincie Flevoland op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b). De chloridetijdreeksen zijn onderverdeeld in klassen volgens tabel B4.

De ruimtelijke verdeling van de chloride tijdreeksen is redelijk beperkt. In het IJsselmeergebied komt slechts 1 grondwaterput voor waarin de chloride concentratie op meerdere tijdstippen is bepaald. In het ondiepe deel van de grondwatermetingen zijn, naast een grote hoeveelheid neutrale punten, ook veel verzoetingspunten terug te vinden. Opvallend is de sterke verzoeting aan de randmeren. Figuur B1 liet namelijk al zien dat het aanwezige water al zoet tot brak was, wat dus betekent dat er binnen de zoetklasse nog redelijk grote veranderingen optreden. Verder treedt er ook verzilting op in het gebied bij de randmeren, maar in veel mindere mate. Figuur B4 laat een voorbeeld zien van een locatie bij de randmeren waarbij er sterke verzoeting optreedt van het grondwater in de top van de ondergrond. Hierbij gaat de chloride concentratie van brak naar zoet water. Voor veel andere locaties bij de randmeren waar verzoeting optreedt, is deze verandering van klasse ook waar te nemen.



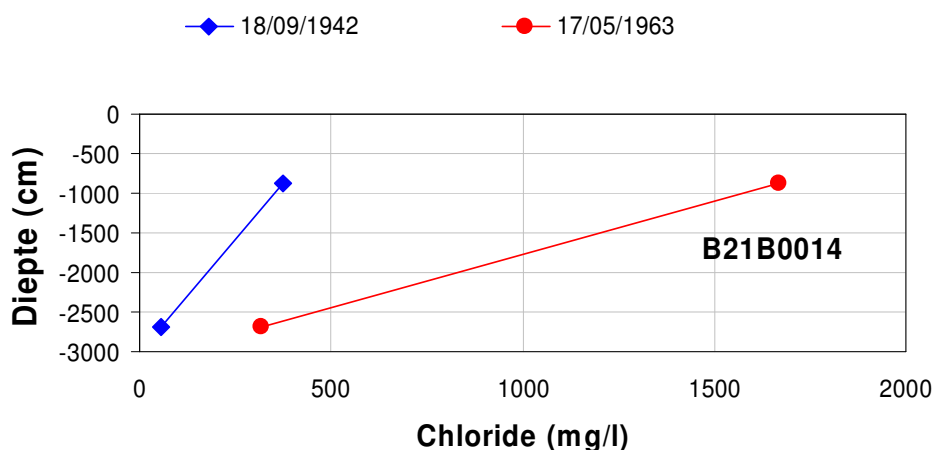
Figuur B4 Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de grondwaterput B26G0091.

Het middendeel van Flevoland vertoont geen grote veranderingen. Enkele matige verzoetings- en verziltingspunten komen verspreid over het oppervlak voor. In de Noordoostpolder komen duidelijk meer verzoetingspunten voor. Figuur B5 laat zien dat de chloride concentratie in het ondiepe deel kan veranderen van zout tot brak; een verandering van twee klassen. De diepere punten van Figuur B5 laten minder variatie zien en blijven in het brakke deel liggen. Ook andere punten in de Noordoostpolder geven een soortgelijk beeld.



Figuur B5 Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de grondwaterput B15H0001.

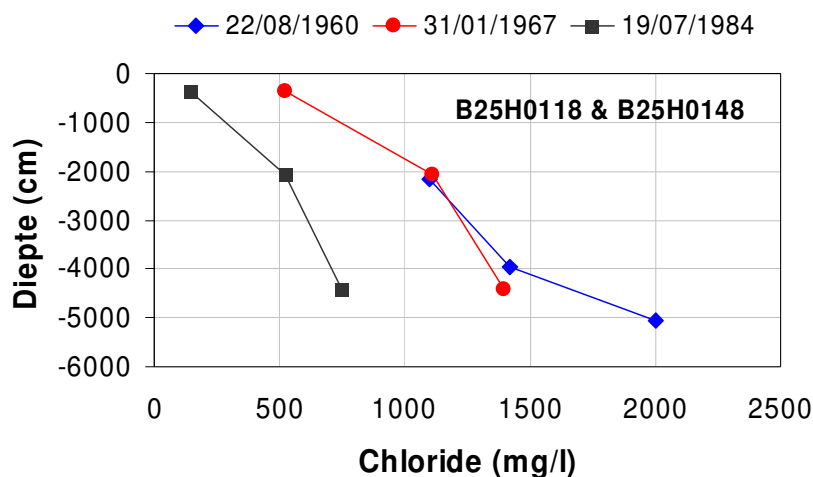
Voor het beschouwen van de variatie in chloride concentratie met de tijd moet ook bedacht worden dat niet alleen de tijdsstap van belang tussen twee metingen, maar ook de periode waarin de metingen zijn uitgevoerd. Figuur B6 illustreert dit verschil, waarbij het sterke verzoetingspunt is genomen in de Noordoostpolder. In dit figuur is te zien dat er duidelijk verzilting optreedt in de tijd met een verandering van brak naar matig zout, maar de onderzochte periode loopt slechts tot 1963. Het kan zo zijn na dit tijdstip juist sterke verzoeting optreedt op deze locatie. Figuur B5 loopt bijvoorbeeld door tot 1990, waarbij het grootste verschil in chloride concentratie is opgetreden in de periode 1958-1980. Wat er in de tussenliggende periode is gebeurd, kan hiermee niet bepaald worden, maar geeft wel aan dat een grotere tijdsspanne een ander beeld kan geven.



Figuur B6 Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de grondwaterput B21B0014.

Op een diepte van 4000-6000 cm treedt er nog minder verzoeting en verzilting op (figuur B3b). In het middendeel van Flevoland zijn de veranderingen klein, waarbij de meeste locaties neutraal blijven. Ook bij de randmeren zijn er minder veranderingen waar te nemen. Opvallend zijn de vele verzoetingspunten in het zuidwestelijke deel van de Flevopolder. Deze komen deels overeen met de zoute tot zeer zoute monsters van

Figuur B1b op deze diepte. Figuur B2 geeft al een voorbeeld van de verzoetingsprocessen die in dit gebied optreden. Figuur B7 ligt ook in de buurt van Almere en laat zien dat in de periode 1960-1984 een duidelijke verzoeting is opgetreden in dit gebied, waarbij op sommige diepten een duidelijke overgang van matig zout naar brak terug te vinden is.



Figuur B7 Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen voor de gecombineerde grondwaterput B25H0118 & B25H0148.

Kationuitwisselingsprocessen

Naast het gebruik van de variatie in chloride concentratie met de tijd voor het bepalen van verzoetings- en verziltingsprocessen kan ook gekeken worden naar eventuele kationuitwisselingsprocessen die optreden. Het principe is als volgt:

De beschouwde kationuitwisseling is gebaseerd op de reacties die optreden bij verdringing van zoet grondwater door zout grondwater en vice versa. De belangrijkste kationen van zout grondwater zijn natrium en kalium, terwijl zoet grondwater grotendeels calcium bevat. Bij het verdringen van het zoete of zoute front ontstaat er uitwisseling van kationen. Hierbij kan de uitwisseling van natrium het beste beschouwd worden doordat dit kation de snelste uitwisseling laat zien. Bij een verzoeting van het grondwater zal natrium gemakkelijker in oplossing gaan en desorberen van de aanwezige vaste fase in de ondergrond. Bij verzilting zal dit juist andersom gebeuren. Voor meer informatie zie ook Griffioen (2003).

De berekening van de sorptie eigenschappen van natrium kan berekend worden aan de hand van:

$$NaZ = (Na) - (Na)_{cons}$$

$$(Na)_{cons} = (Na)_{zoet} + [(Na)_{zoe} - (Na)_{zoet}] * [(Cl) - (Cl)_{zoet}] / [(Cl)_{zoe} - (Cl)_{zoet}]$$

Waarbij Na_{cons} omschreven wordt als het conservatieve natriumgehalte; een soort verwachte natriumconcentratie vanuit het gemeten chloride concentratie wat vervolgens vergeleken wordt met de gehalten aan natrium en chloride in de twee eindleden zoet en zout grondwater. De gehalten van deze eindleden worden beschouwd als de meest extreme waarden die kunnen voorkomen. In dit geval zijn de volgende gegevens gebruikt:

Zoet water = samenstelling van oud Rijnwater uit de periode rond 1945

Zout water = samenstelling van Noordzeewater

Vervolgens wordt het berekende conservatieve natriumgehalte van het gemeten gehalte afgehaald waarmee NaZ ontstaat, wat wordt uitgedrukt in meq/l. Is dit getal positief dan treedt er op verzoeting op (desorptie), is dit getal negatief dan treedt er verzilting op (adsorptie).

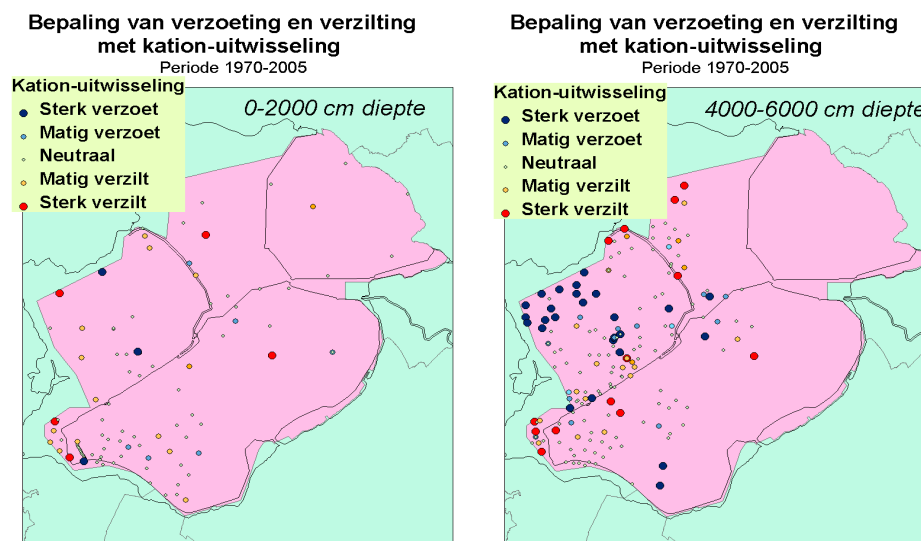
Deze berekening is uitgevoerd voor de 865 natriumanalyses die zijn meegenomen in dit onderzoek. Ook deze analyses zijn weer onderverdeeld in vijf klassen met vergelijkbare beschrijving als de tijdreeksen van chloride. De keuze in klassengrenzen is ook nu arbitrair gekozen, maar zal wel een redelijke indicatie geven van de processen.

Tabel B5 Klassenindeling van de kationuitwisseling van natrium voor de bepaling van verzoeting en verzilting in grondwaterputten van de Provincie Flevoland

Klasse	NaZ (meq/l)	Omschrijving	Aantal monsters in klasse
1	> 200	Sterke verzoeting	52
2	100 tot 200	Matige verzoeting	72
3	-100 tot 100	Neutraal	644
4	-100 tot -200	Matige verzilting	61
5	< -100	Sterke verzilting	34

Figuur B8a en b illustreren de grootste verschillen die optreden in de ruimtelijke zin voor de uitwisseling van natrium op een bepaalde diepte. Opvallend is de ongelijke verdeling van de monsterpunten en het aantal metingen per dieptelaag. Op een diepte van <2000 cm is natrium weinig bepaald en zijn er geen duidelijke verzoetings- of verziltingsprocessen terug te vinden, behalve een redelijke verzilting in de zuidwest hoek van het IJsselmeer.

Op een diepte van 4000-6000 cm zijn echter veel meer natriumbepalingen uitgevoerd. De metingen op deze diepte zijn geclusterd in het westelijke deel van het IJsselmeer en rond Almere in de periode 1975-1985. Deze locaties komen in de chloride tijdreeksen niet of nauwelijks voor waardoor de methoden moeilijk te vergelijken zijn voor dit gebied. In het westelijk deel van het IJsselmeer is een sterke verzoeting terug te vinden en ook deels in het middendeel tegenover Almere, Oostvaardersplassen en Lelystad. Deze gebieden zijn over het algemeen brak tot matig zout (Figuur B1b). Verzilting komt ook weer in het westelijk deel van het IJsselmeer terug, maar ook in het Noorden. Deze gebieden zijn matig zout tot zout.



Figuur B8 Ruimtelijke verdeling van de uitwisseling van natrium voor de bepaling van verzoeting en verzilting voor de periode 1970-2005 in de Provincie Flevoland op een diepte van <2000 cm (a) en 4000-6000 cm (b). De uitwisseling van natrium is onderverdeeld in klassen volgens tabel B5.

Vergelijking van de methoden

De kationuitwisseling van natrium is bepaald voor locaties waar ook chloride is gemeten. Deze locaties komen niet altijd overeen met de tijdreeksen van chloride. In totaal zijn er 395 grondwaterputten met filters waarbij zowel chloride tijdreeksen als uitwisseling van natrium is bepaald. Voor het bepalen van de verschillen tussen deze methode is de volgende regel gehanteerd:

“Zodra het verschil tussen de methoden meer dan 1 klasse bedraagt (klassenindeling volgens tabel B4 en B5), wordt er gezegd dat de methoden verschillen.”

Dit betekent dat de methoden verschillen als de ene methode een punt als sterk verzoet aangeeft, terwijl de andere methode dit punt als neutraal of verzilt beschouwt en vice versa. Voor 88 punten is dit het geval. Het grootste deel van deze punten zijn afkomstig van de meetnetten, waarbij de grondwaterputten frequenter worden bemonsterd en gemeten (1 a 2 jaar). Door deze punten te verwijderen blijven er nog 84 over, waarvan 16 punten een verschil laten zien tussen de methoden. Voor deze punten geldt vaak dat de vergelijking tussen de methoden niet altijd eerlijk is doordat de kationuitwisseling op één tijdstip wordt waargenomen, terwijl de chloride tijdreeks een veel langer periode beslaat. Bij de kationuitwisseling is de voorgaande periode van belang voor het bepalen van verzoeting of verzilting, terwijl bij de chloride tijdreeksen wordt gekeken naar de periode die daarop volgt.

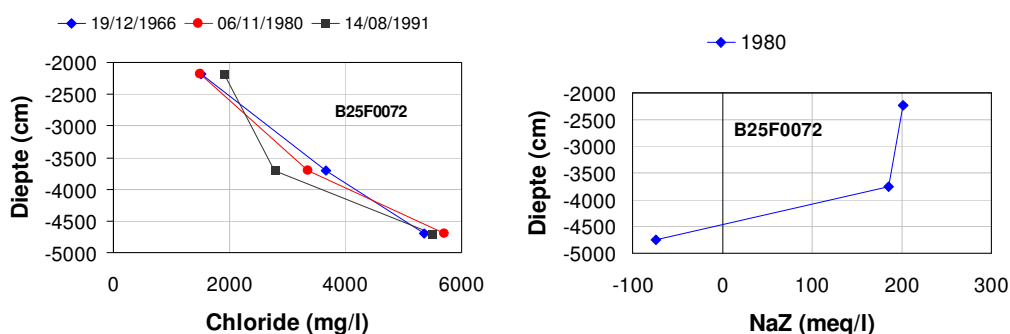
Figuur B9a en b laten hier een voorbeeld van zien. Chloride is voor grondwaterput B25F0072 op drie verschillende tijdstippen op drie verschillende diepten gemeten. Uitwisseling van natrium is voor het jaar 1980 bepaald, wat overeenkomt met de middelste meting van de chloride reeks. In tabelvorm zien de resultaten er uit zoals in tabel B6 beschreven. De verandering van chloride tussen 1966-1980 wordt toegeschreven aan de tijdlaag van 1966 (periode 1965-1975, klasse 2, tabel B1) en de verandering tussen 1980-1991 aan de tijdlaag 1980 (periode 1975-1985, klasse 3, tabel B1). De uitwisseling van natrium in 1980 komt ook in de periode 1975-1985 (klasse 3) terecht, waardoor dit vergeleken wordt met de verandering van chloride in de periode 1980-1991. Uit tabel B6 blijkt dat deze vergelijking vooral grote verschillen oplevert op een diepte van 2100 cm, waarbij de uitwisseling van natrium aangeeft dat er een sterke verzoeting optreedt, terwijl de chloride tijdreeks een sterke verzilting laat zien. De

uitwisseling van natrium zou met de voorgaande periode vergeleken moeten worden, maar op deze diepte is daar ook een groot verschil te zien, waarbij de chloride tijdreeks in de neutrale klasse valt. De verklaring voor dit verschil is niet eenvoudig te geven, maar kan eventueel verklaard worden door grote fluctuaties rond het tijdstip van bemonstering (rond 1980).

Op andere diepten komen de methoden wel overeen. Bij een diepte van 4750 cm is er nog wel een verschil in verzoeting/verziltende klasse maar dit wordt mede veroorzaakt door de arbitraire indeling van de klassen (tabel B4 en B5).

Tabel B6 Vergelijking van chloride tijdreeks en uitwisseling van natrium op verschillende diepten voor grondwaterput B25F0072

Diepte (cm)	dCl/dt 1966-1980 in mg/l/dag*1000 (klasse)	NaZ 1980 in meq/l (klasse)	dCl/dt 1980-1991 in mg/l/dag*1000 (klasse)
2100	-4 (3)	201 (1)	105 (5)
3750	-61 (2)	186 (2)	-147 (1)
4750	66 (4)	-74 (3)	-53 (2)



Figuur B9 Diepteprofiel van de chloride concentratie op verschillende tijdstippen (a) en de uitwisseling van natrium in 1980 voor grondwaterput B25F0072 (b).

Conclusies

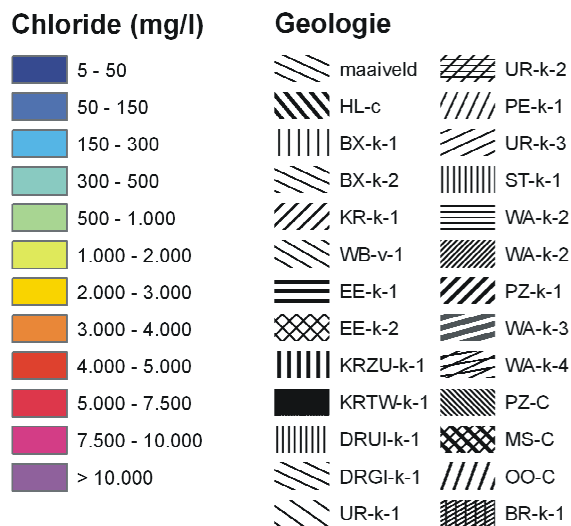
Bovenstaande resultaten geeft de volgende conclusies:

- De chloride concentratie heeft een grote variatie in ruimte en diepte, maar minder in de tijd. Zoete gebieden bevinden zich bij de randmeren en tussen Almere en Lelystad. Het IJsselmeer en het middendeel van Flevoland is grotendeels brak tot matig zout tot een diepte van ongeveer 4000 cm. Op een grotere diepte (4000-6000 cm) is het grondwater van het IJsselmeer matig zout tot zout en is vooral rond Almere een groot zout tot zeer zout gebied te vinden;
- Over het algemeen laten de figuren voor verzoeting en verziltende met chloride tijdreeksen zien dat er verzoeting optreedt in meerdere gebieden van Flevoland, vooral in de Noordoostpolder en de toch al redelijk zoete randmeren. Voor deze analyse is de tijdsspanne van de analyse van groot belang. Verziltende treedt in sommige delen nog wel op tot de jaren '70 maar daarna is er bijna alleen maar verzoeting te zien;
- De uitwisseling van natrium beschouwt een ander deel van de provincie, waarbij ook verziltende wordt waargenomen in het noorden en westen van het IJsselmeergebied. Verzoeting treedt sterk op in het noordwesten van het IJsselmeer, vooral op een diepte van 4000-6000 cm;

- Uit de vergelijking van de methoden blijkt dat er in principe geen grote verschillen zijn. Eventuele verschillen kunnen verklaard worden door het verschil in periode wat wordt beschouwd met de methoden. Uitwisseling van natrium kijkt naar verzoeting of verzilting in de periode voorgaand aan de meting, terwijl de chloride tijdreeks kijkt naar de processen in de periode na de meting. Over het algemeen geeft de uitwisseling van natrium (kationuitwisseling) informatie over de verzoeting en verzilting voor een beperkte tijdsperiode (verandering in voorgaand jaar), terwijl de chloride tijdreeksen een langere periode kan beslaan (afhankelijk van tijdsstap). Voor het onderzoeken van de verzoetings- en verziltingsprocessen over een langere periode zal het toepassen van de chloride tijdreeks betere resultaten geven.

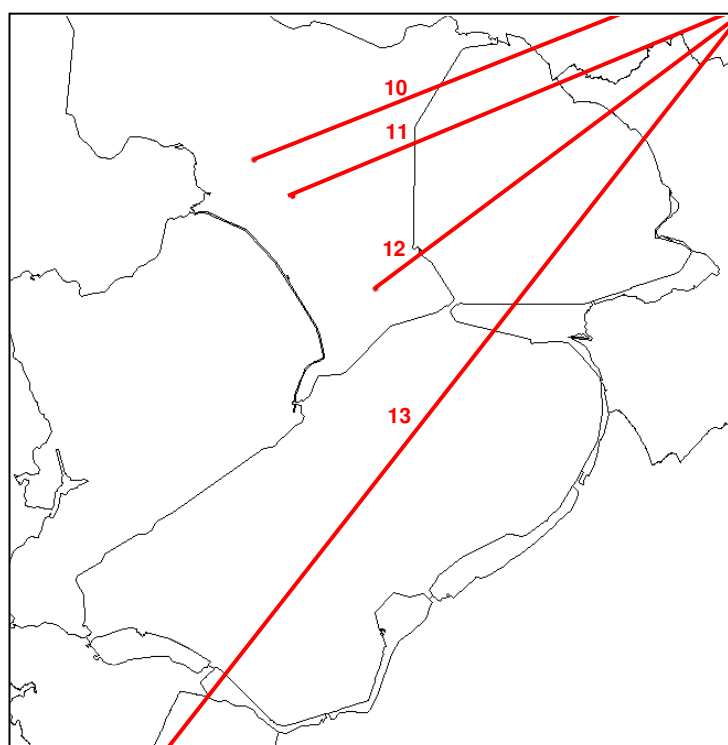
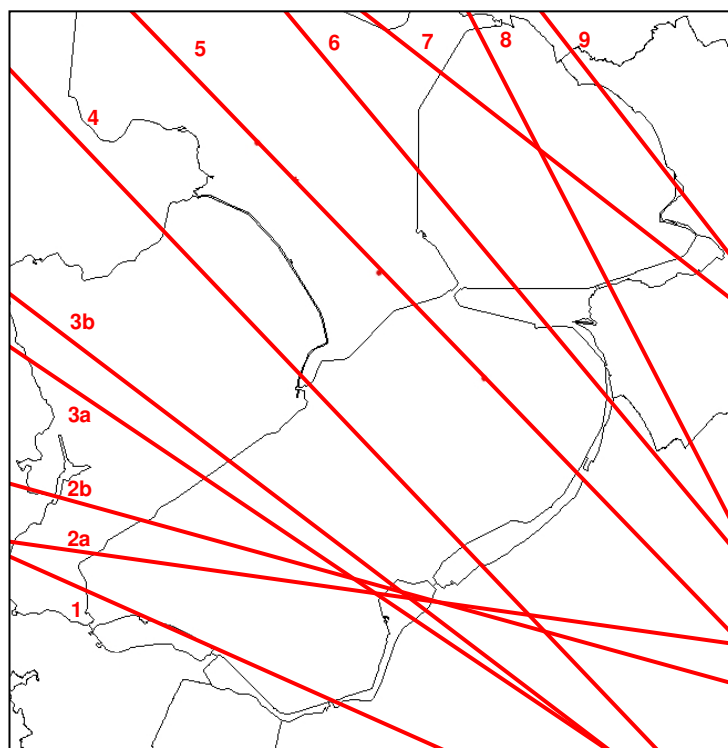
C Profielen chloride patronen en link geologie

C.1 Legenda

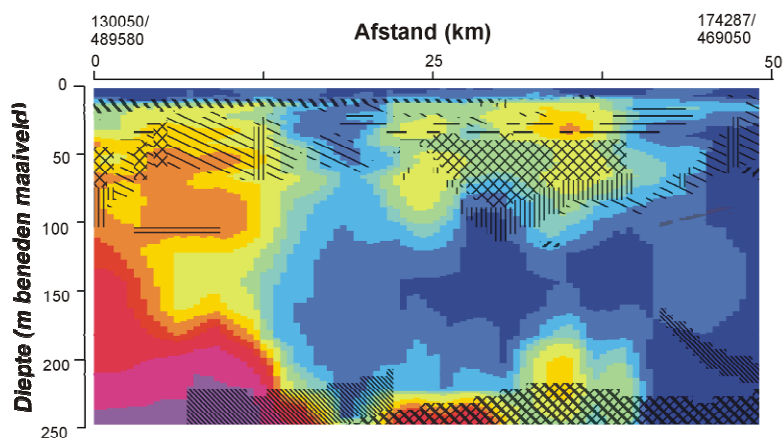
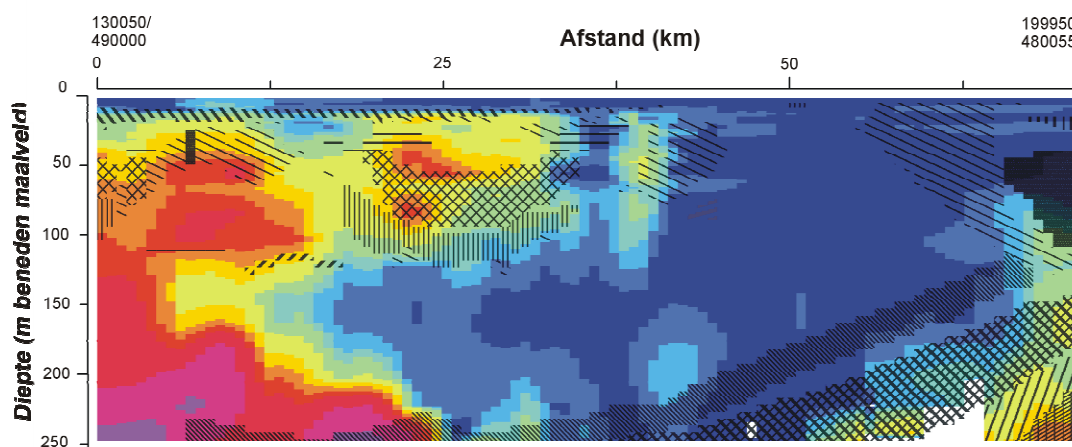
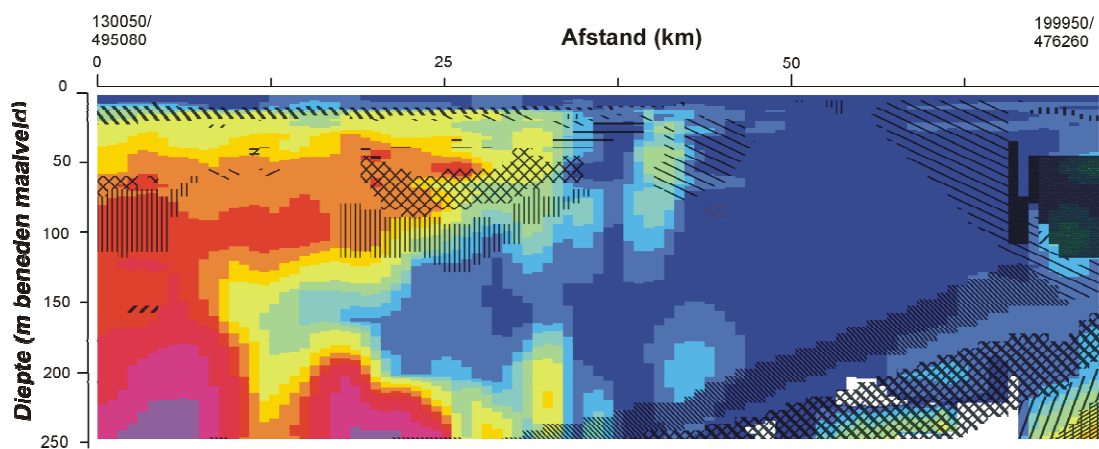


Afkorting	Voluit		
HL	Antropogeen+ Holocene	k	klei
BX	Boxtel	z	zand
KR	Kreftenheye	v	veen
WB	Woudenberg	c	Geen overheersende lithologie
EE	Eem		
KRZU	Kreftenheye/Zutphen		
KRTW	Kreftenheye/Twello		
DRUI	Drente(/Uitdam)		
DRGI	Drente (/Gieten)		
UR	Urk		
PE	Peelo		
UR	Urk		
ST	Sterksel		
WA	Waalre		
PZ	Peize		
MS	Maassluis		
OO	Oosterhout		
Br	Breda		

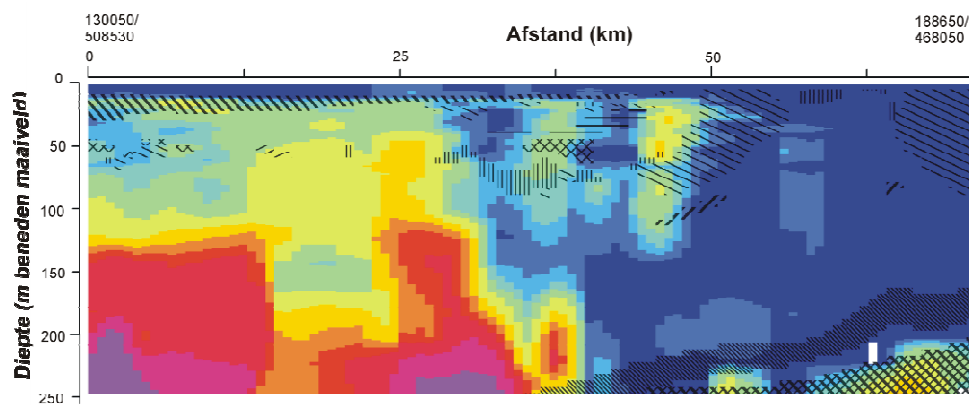
C.2 Overzicht ligging van profielen



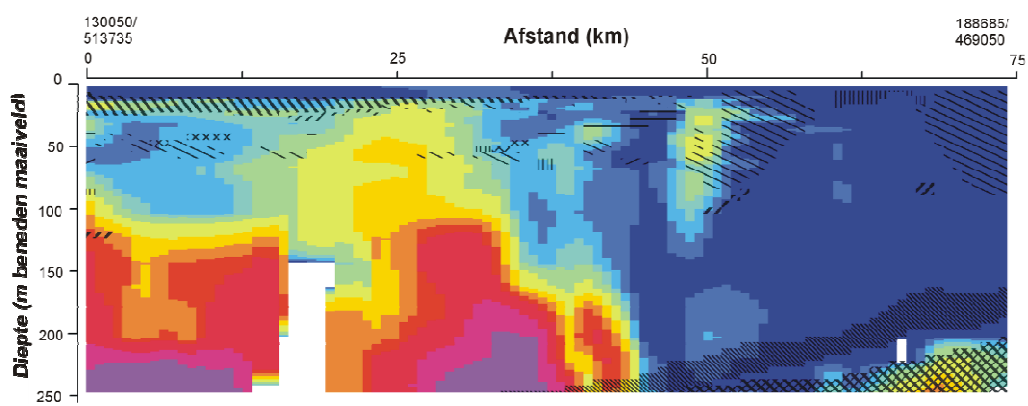
C.3 Chloride concentraties and scheidende lagen in profielen

Profiel 1**Profiel 2a****Profiel 2b**

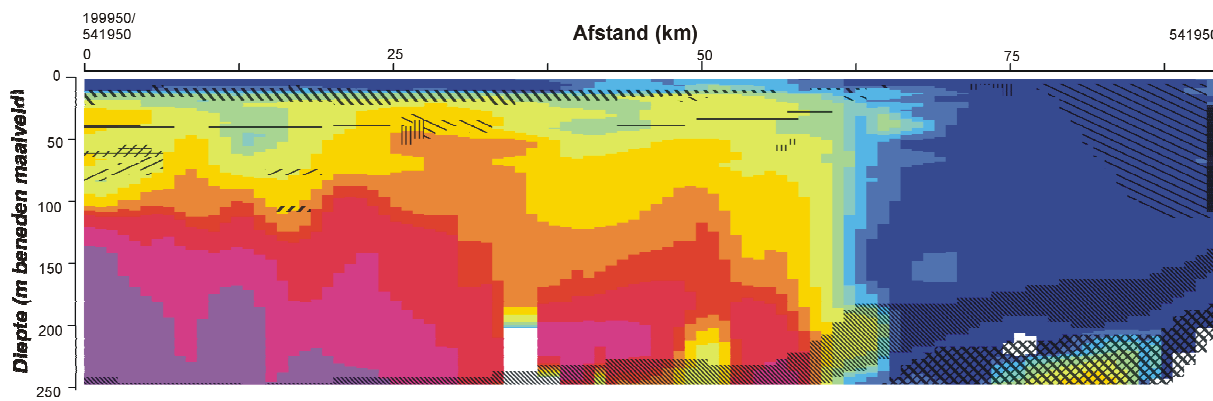
Profiel 3a



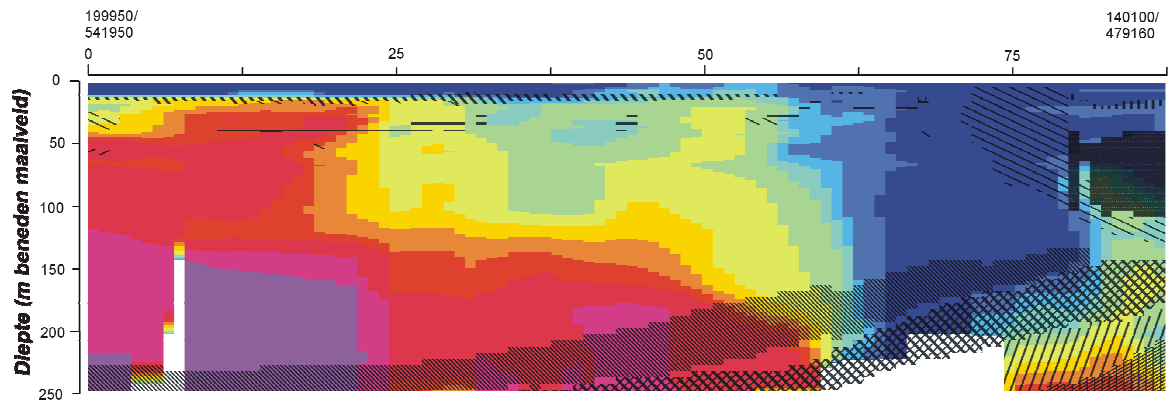
Profiel 3b



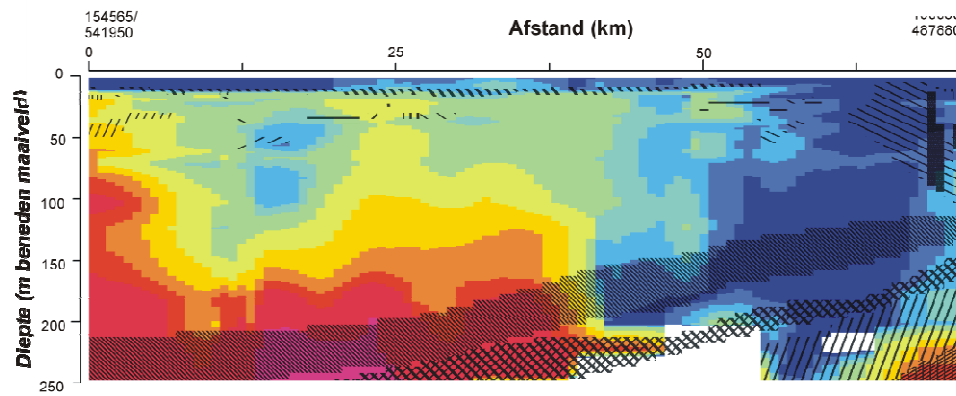
Profiel 4



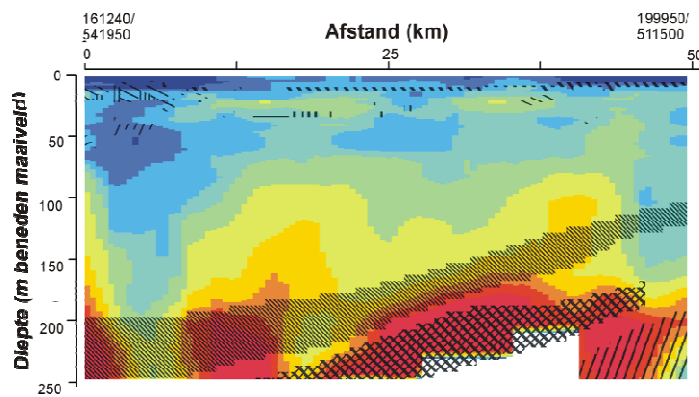
Profiel 5

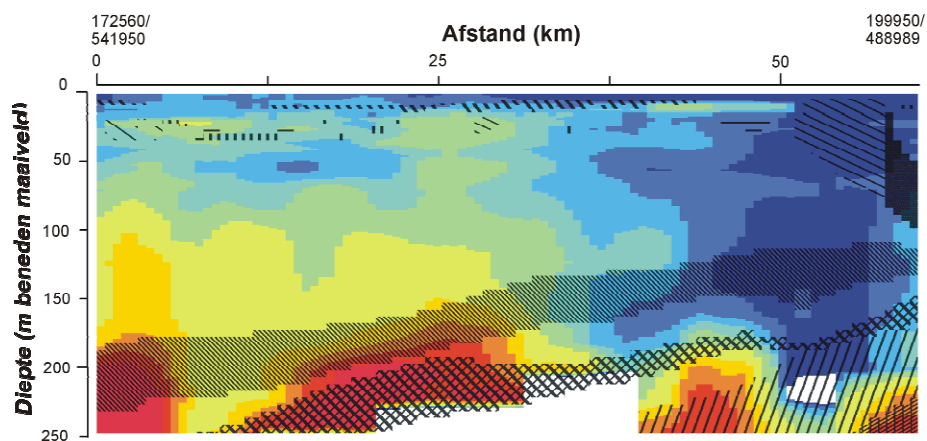
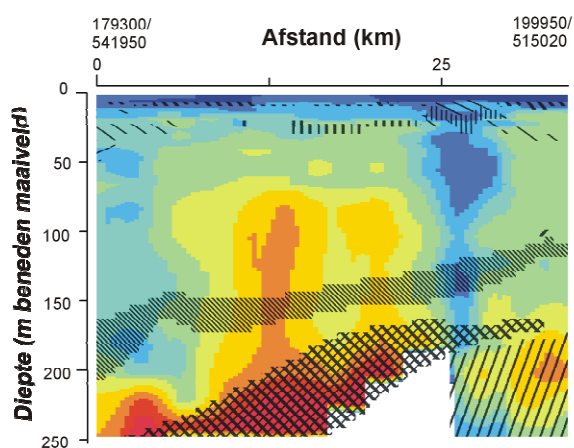
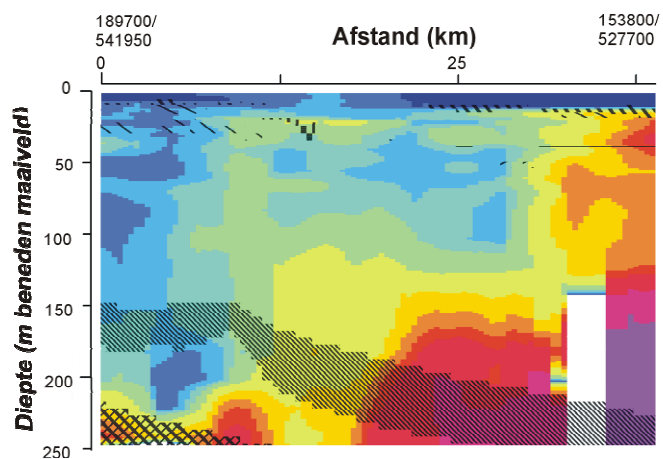


Profiel 6

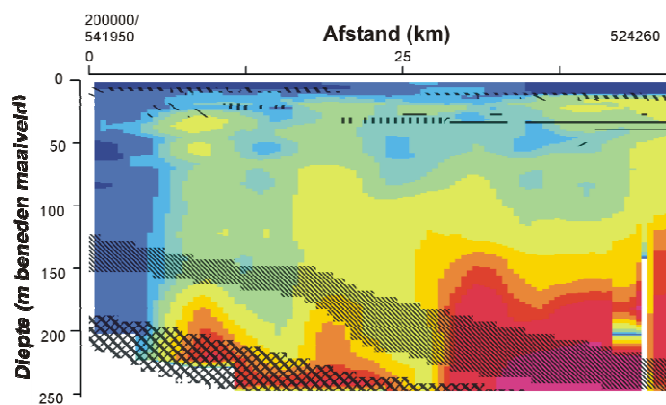


Profiel 7

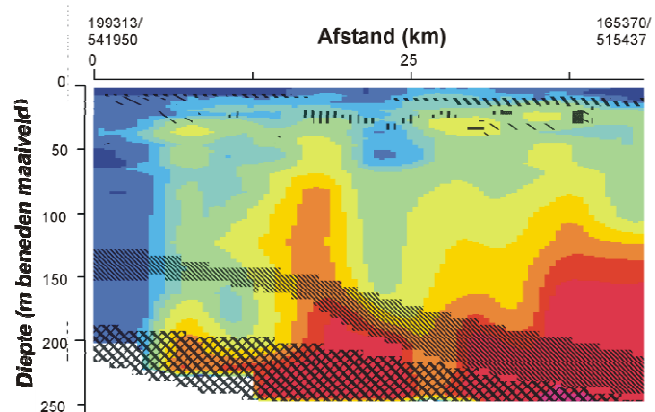


Profiel 8**Profiel 9****Profiel 10**

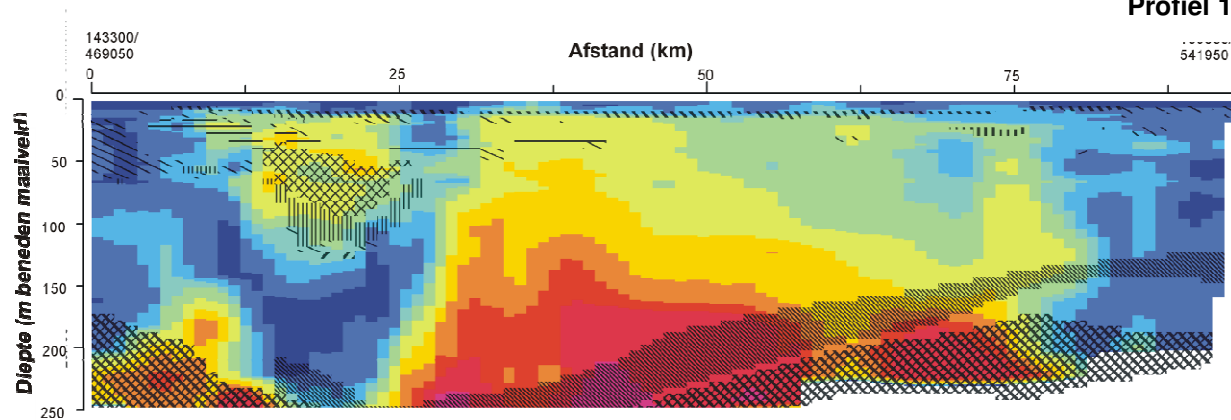
Profiel 11

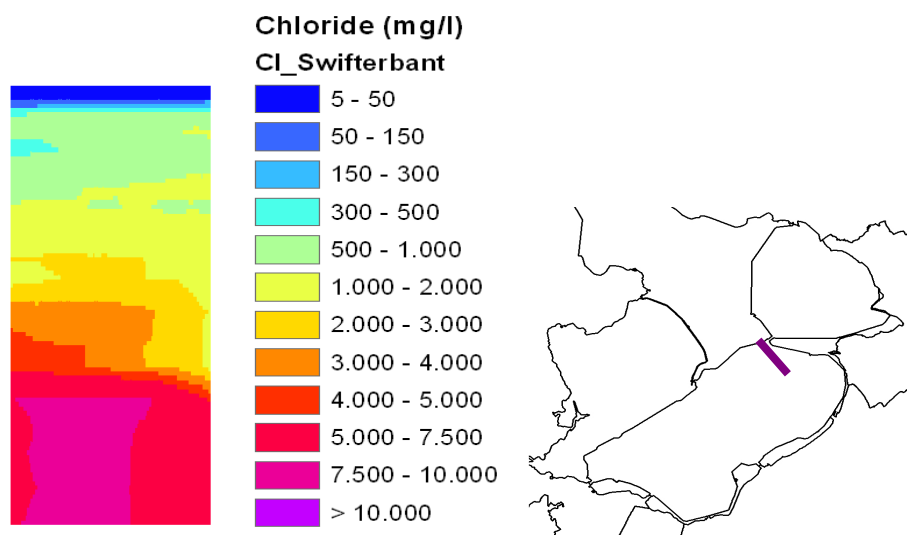
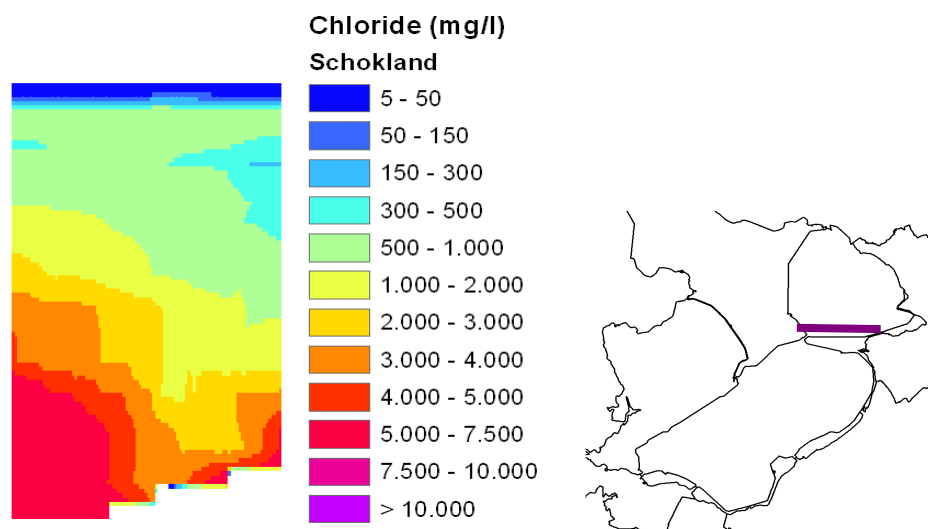
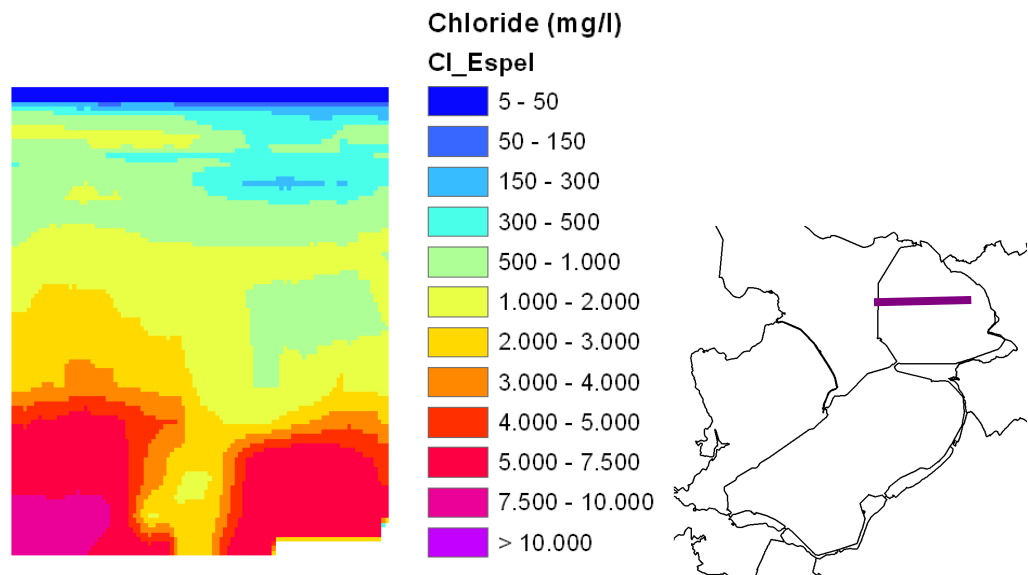


Profiel 12

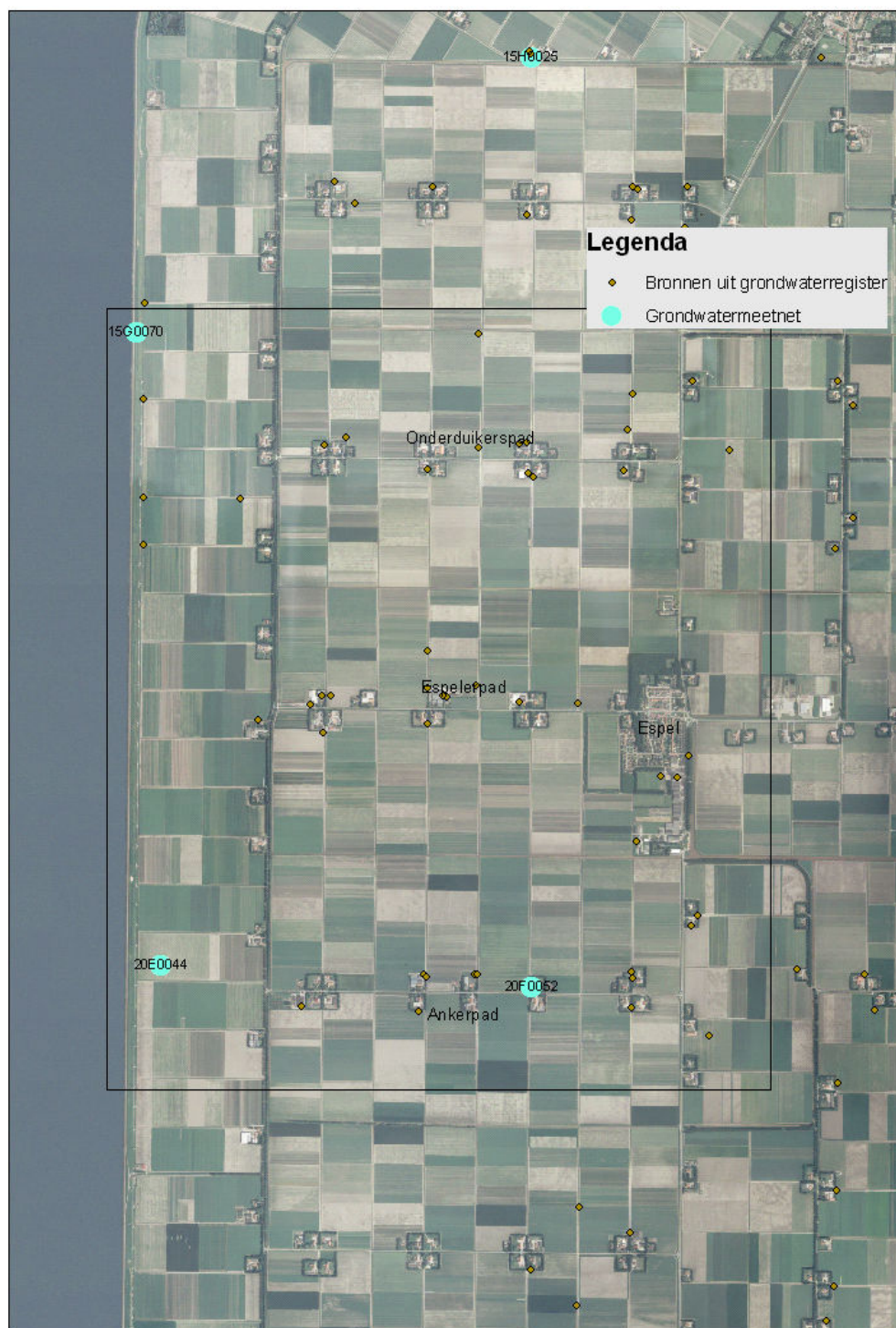


Profiel 13





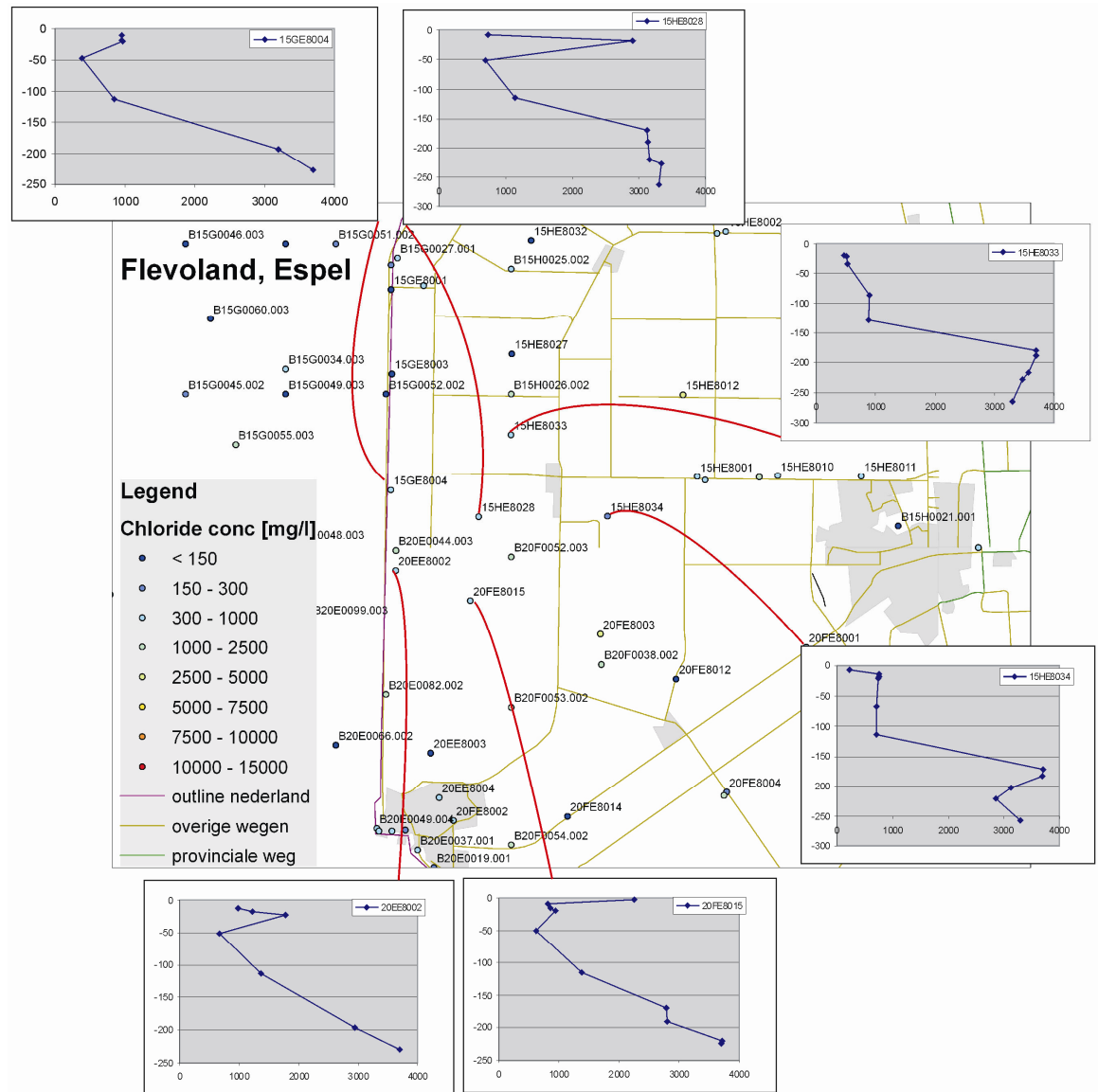
D Aandachtsgebied meetcampagne: satelliet beeld



E Gegevens eigenaren van bemeten onttrekkingsputten.

0	170850	526600	Fa. Burger Valkkoog	Espelerpad	10	8311PS	Espel
2	170950	526550	Fa. Burger Valkkoog	Espelerpad	10	8311PS	Espel
3	170971	526547	Fa. Burger Valkkoog	Espelerpad	10	8311PS	Espel
6	172407	526046	Oegema Wieringa B.V. loonbedrijf	Vaartweg	34	8311AA	Espel
8	172600	524450	A. Driessen	Espelerringweg	9	8311PA	Espel
9	172489	525127	E. Ziel	Espelerringweg	3	8311PA	Espel
10	172533	525190	E. Ziel	Espelerringweg	3	8311PA	Espel
11	170800	524600	J.M. van Tiggelen	Ankerpad	9	8311PB	Espel
12	172123	524619	M.A. Dekkers	Ankerpad	3	8311PB	Espel
13	172121	524839	A.H.T. van Meijel	Ankerpad	4	8311PC	Espel
14	172128	524806	A.H.T. van Meijel	Ankerpad	4	8311PC	Espel
17	170834	524827	M.J. Koetsenruyter	Ankerpad	12	8311PD	Espel
19	169690	527770	H. Hoving	Westermeerweg	43	8311PE	Espel
20	169090	527780	A.J. van de Vlies	Westermeerweg	45	8311PG	Espel
21	170212	528100	Mts. Langedijk	Westermeerweg	39	8311PG	Espel
22	169089	527487	Mts. Langedijk	Westermeerweg	39	8311PG	Espel
23	169090	528390	P.H.J. en C.P.M. Maas - Timmermans	Westermeerweg	49	8311PG	Espel
24	170857	526380	H.R. Heukers	Espelerpad	11	8311PR	Espel
25	170206	526325	N.L.M. v.d. Voort	Espelerpad	15	8311PR	Espel
26	171424	526513	Bloembollenbedrijf Menting	Espelerpad	8	8311PS	Espel
27	171791	526506	J. de Sain	Espelerpad	4	8311PS	Espel
28	171157	526614	Mts. Menting	Espelerpad	8	8311PS	Espel
30	170125	526500	Mts. J.G.A. Bastiaanssen	Espelerpad	16	8311PT	Espel
31	170200	526550	Mts. J.G.A. Bastiaanssen	Espelerpad	16	8311PT	Espel
32	170200	526550	Mts. J.G.A. Bastiaanssen	Espelerpad	16	8311PT	Espel
33	170250	526550	Mts. J.G.A. Bastiaanssen	Espelerpad	16	8311PT	Espel
34	171425	528114	Van der Avoird, Espel B.V.	Onderduikerspad	8	8311PV	Espel
35	171474	528118	Van der Avoird, Espel B.V.	Onderduikerspad	8	8311PV	Espel
36	170350	528150	M. Nijenhuis	Onderduikerspad	14	8311PW	Espel
37	171169	528084	Mts. Sloodman - Claassen	Onderduikerspad	10	8311PW	Espel
39	172070	527946	A.P. Hanse	Onderduikerspad	3	8311PX	Espel
40	171510	527906	E. Delahaye	Onderduikerspad	5	8311PX	Espel
43	171476	527925	P.T. Louws	Onderduikerspad	7	8311PX	Espel

F Inversies brak-zoet grondwater in het veldwerkgebied



G Korte beschrijving software code MOCDENS3D

MOCDENS3D

De softwarecode die gebruikt wordt voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en gekoppeld stoftransport is MOCDENS3D (Oude Essink, 1998, 2000; Vugt *et al.*, 2003). De code is gebaseerd op de volgende twee codes, die volledig geïntegreerd zijn: 1. MODFLOW (McDonald en Harbaugh, 1988) aangepast voor dichtheidafhankelijke grondwaterstroming, en 2. MOC3D (Konikow *et al.*, 1996) voor de verplaatsing van zoet, brak en zout grondwater. De code is een samenvoeging van state-of-the-art software op het gebied van zowel grondwaterstroming als stoftransport. Met MOCDENS3D is het mogelijk niet-stationaire stroming van zoet, brak en zout grondwater te modelleren. Deze code bestaat uit een module voor grondwater en een module voor stoftransport die aan elkaar gekoppeld zijn.

Voorafgaand is MOCDENS3D toegepast in een flink aantal zoet-zout studies in Nederland, zoals Project Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel (in samenwerking met Witteveen+Bos, 2000), Project Het Zout der Aarde (verziltiononderzoek Hoogheemraadschap van Rijnland, in samenwerking met KIWA, 2005); bij de bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland (Minnema *et al.*, 2004); de effectenberekening van Bodemdaling in Barradeel II, Friesland (Wetterskip Fryslân, 2005); bij de bepaling van de effecten van de Hoofdwegverbinding A6-A9 op zoet-zout grondwater nabij het Naardermeer (Oude Essink *et al.*, 2006); bij de bepaling van de effecten van zomerbedverdieping van het stuwpand Sambeek op de drinkwaterwinning (Oude Essink, G.H.P. & Kleine, M., 2006); en bij de bepaling van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, (Stuurman, R. *et al.*, concept, 2007).

Dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming

In het grondwatersysteem van de provincie Zuid-Holland is de dichtheidsverdeling in de kustzone zodanig dat er rekening moet worden gehouden met het effect van dichtheidverschillen op de grondwaterstroming. Omdat zout grondwater zwaarder is dan zoet (of brak) grondwater, beïnvloedt het de stroming van water in de ondergrond. Zo kan zout grondwater in een natuurlijk hydrogeologisch systeem (dus zonder externe spanningen als onttrekkingen of peilverlagingen) door drukverschillen zoet grondwater wegdrücken (de welbekende zoutwaterintrusie in watervoerende pakketten). Aan de andere kant kan zoet grondwater, doordat het lichter is, juist op het zoute grondwater blijven drijven en in grote mate een min of meer geïsoleerd grondwatersysteem in stand houden. Zo drijft in het Nederlandse duingebied zoet grondwater (dichtheid van 1000 kg/m³) op zout grondwater (dichtheid van ongeveer 1022 kg/m³), in de vorm van een zoetwaterlens.

Correcties naar zoetwaterstijghoogte

Terwijl onder normale omstandigheden (d.w.z. met een dichtheid van zoet grondwater) gewerkt kan worden met 'gewone' stijghoogten, moet je in een situatie met zoet, brak en zout grondwater alles omrekenen naar drukken. Opgeloste stoffen in het grondwater verhogen namelijk de druk. De meeste hydro(geo)logen vinden het werken met stijghoogte echter prettiger. Daarom worden alle gemeten stijghoogten waar het grondwater niet zoet is gecorrigeerd voor de dichtheid. Om dit aspect mee te nemen moet de stijghoogte worden omgerekend naar een zogenaamde equivalente *zoetwaterstijghoogte*.

De zoetwaterstijghoogte is eigenlijk een fictieve parameter zonder fysische betekenis. De fysische interpretatie van zoetwaterstijghoogten patronen is niet gemakkelijk. Zo staan zoetwaterstijghoogten niet meer loodrecht op stroomlijnen als de dichtheid varieert, en betekent een gradiënt in zoetwaterstijghoogte niet automatisch dat er stroming van grondwater optreedt. De noodzakelijke correcties voor de dichtheid kunnen significant zijn: een filterbuis gevuld met 20 m zout grondwater heeft een equivalente zoetwaterstijghoogte van 20.5 m: een verschil van 0.5m (Santing, 1980; Oude Essink, 2001).

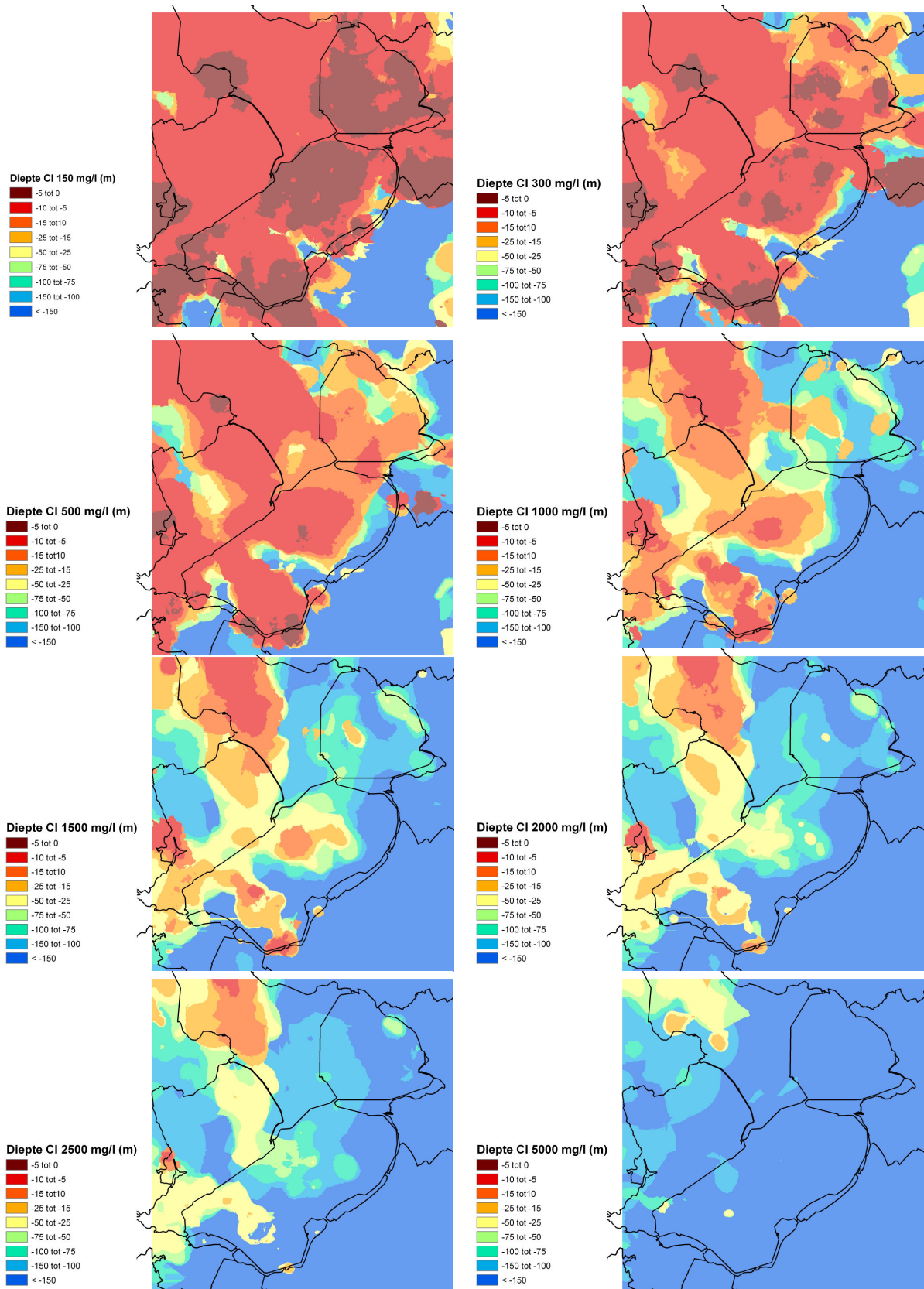
Referenties:

- KIWA (2005), Het zout der aarde: kwantificeren van de toekomstige vraag naar en beschikbaarheid van goed water voor Rijnland; onderzoeksrapport in opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland;
- Konikow, L.F., D.J. Goode & G.Z. Hornberger (1996), A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D); U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 p;
- McDonald, M.G. & A.W. Harbaugh (1988), A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model; U.S.G.S. Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 pp;
- Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P., 2004, Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond;
- Oude Essink, G.H.P. (1998), Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D. Stromingen 4(1): 5-23;
- Oude Essink, G.H.P. (2000), Zoutwaterintrusie in het grondwatersysteem van de Kop van Noord-Holland, Een toepassing van de driedimensionale computer code MOCDENS3D, Stromingen, 6(3), 9-21;
- Oude Essink, G. H. P. (2001). Density dependent groundwater flow: salt water intrusion and heat transport. Lecture notes, Utrecht University, Institute of Earth Sciences, The Netherlands, 136 p;
- Oude Essink, G.H.P. & R.J. Stuurman, (2006), Onderzoek naar de effecten van de Hoofdwegverbinding A6-A9 op zoet-zout grondwater nabij het Naardermeer, 2006-U-R0072/A, 37 p;
- Santing, G. (1980). "Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten, (in Dutch)." H2O 13(22): 544-548;
- Stuurman, R. et al., 2007, Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO rapport, concept, in opdracht van VROM, 81 p;
- Vugt, A., van, Oude Essink, G.H.P. & Biesheuvel, A. (2003), Modelleren van het zoet-zout grondwatersysteem op Texel, Stromingen, 9(1), 33-46;
- Wetterskip Fryslân (2005), Bodemdaling Barradeel II Inrichtingsplan, samenwerking tussen Arcadis en TNO;
- Witteveen & Bos (2000), Groot Geohydrologisch Onderzoek Texel; onderzoeksrapport in opdracht van Provincie Noord-Holland, Waterschap Hollands Kroon, Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen en Gemeente Texel.

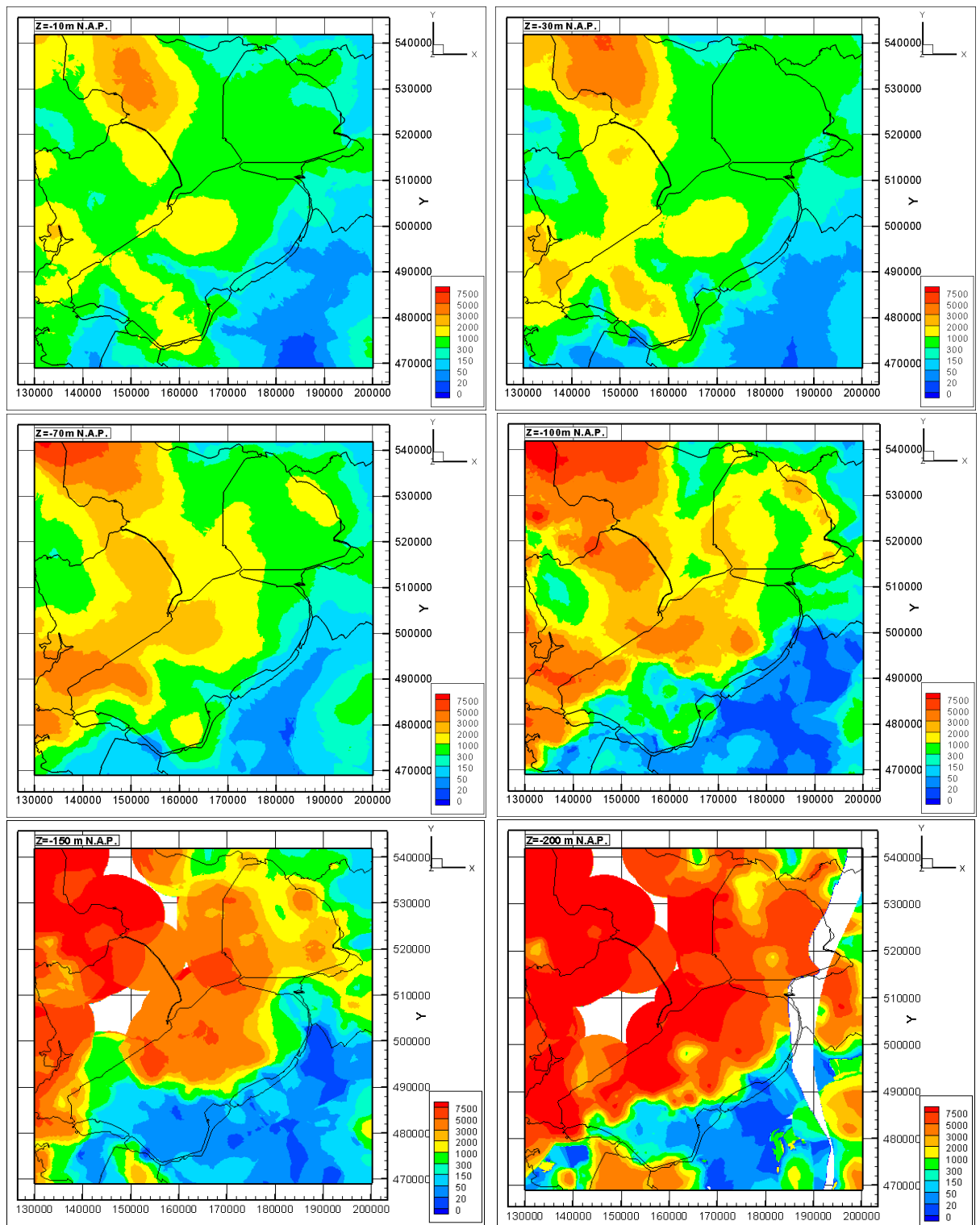
H Scenario's zoet-zout modellering

scenario	onttrekkingstype	geologietype	Type initiële Chloride verdeling
1	1	1	1 = scherp zoet-zout
2	2	1	1
3	3	1	1
4	4	1	1
5	5	1	1
6	1	1	2 = lineair verband
7	2	1	2
8	3	1	2
9	4	1	2
10	5	1	2
11	1	1	3 = exponentieel verband
12	2	1	3
13	3	1	3
14	4	1	3
15	5	1	3
16	1	2	1
17	2	2	1
18	3	2	1
19	4	2	1
20	5	2	1
21	1	2	2
22	2	2	2
23	3	2	2
24	4	2	2
25	5	2	2
26	1	2	3
27	2	2	3
28	3	2	3
29	4	2	3
30	5	2	3
31	1	3	1
32	2	3	1
33	3	3	1
34	4	3	1
35	5	3	1
36	1	3	2
37	2	3	2
38	3	3	2
39	4	3	2
40	5	3	2
41	1	3	3
42	2	3	3
43	3	3	3
44	4	3	3
45	5	3	3

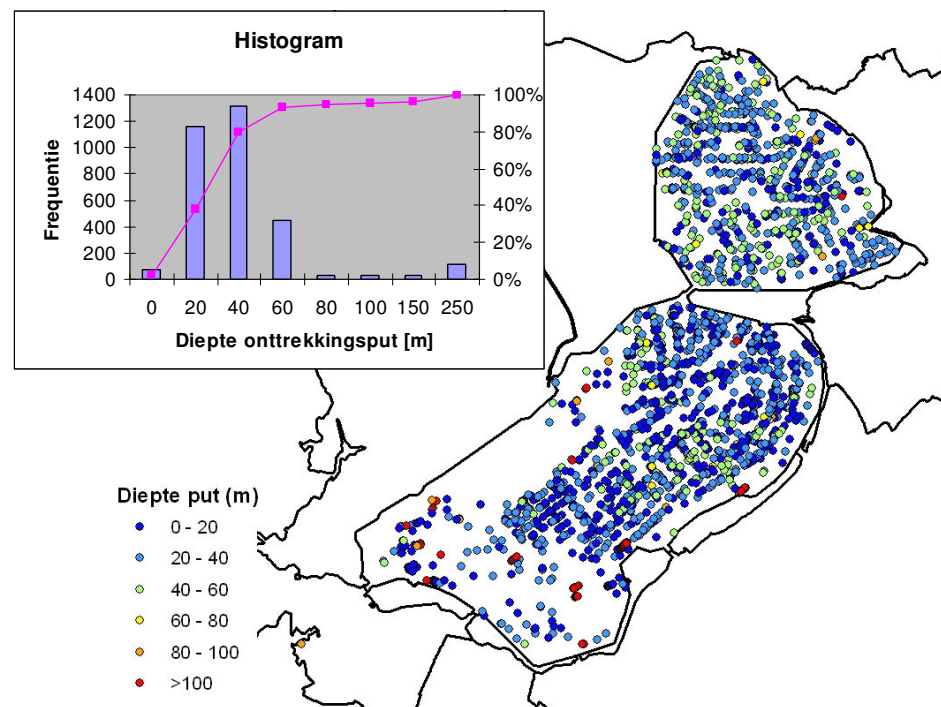
I Positie van grensvlakken tussen zoet-brak en zout



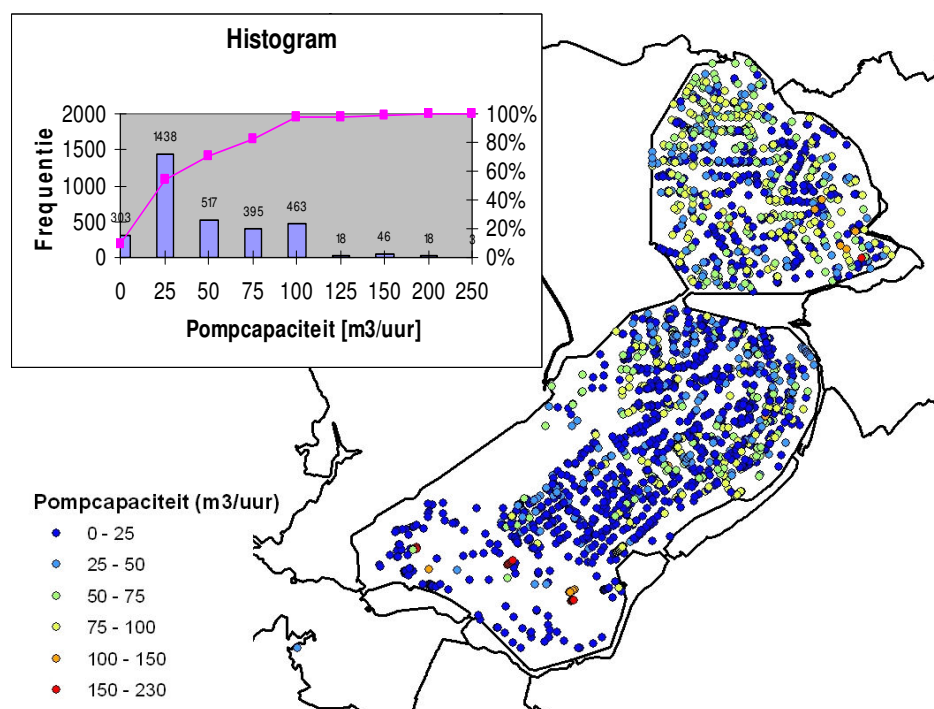
J Chloride gehalten op enkele diepten



K Diepte en pompcapaciteit van onttrekkingsput



Figuur K1 Diepte onttrekkingsput (m).



Figuur K2 Pompcapaciteit van de onttrekkingsput.