

## Potentiële aanvullende grondwatervoorraden

Deelrapportage 4 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves



## Potentiële aanvullende grondwatervoorraden

Deelrapportage 4 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves

## Potentiële aanvullende grondwatervoorraden

Deelrapportage 4 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves

<b>Opdrachtgever</b>	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
<b>Contactpersoon</b>	Reinout Ogilvie
<b>Referenties</b>	Kenmerk: 31174433, Referentie: 4500329490
<b>Trefwoorden</b>	NGR, drinkwatervoorziening, lange termijn, grondwater

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.1
<b>Datum</b>	19-02-2024
<b>Projectnummer</b>	11207846-002
<b>Document ID</b>	11207846-002-BGS-0012
<b>Pagina's</b>	136
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

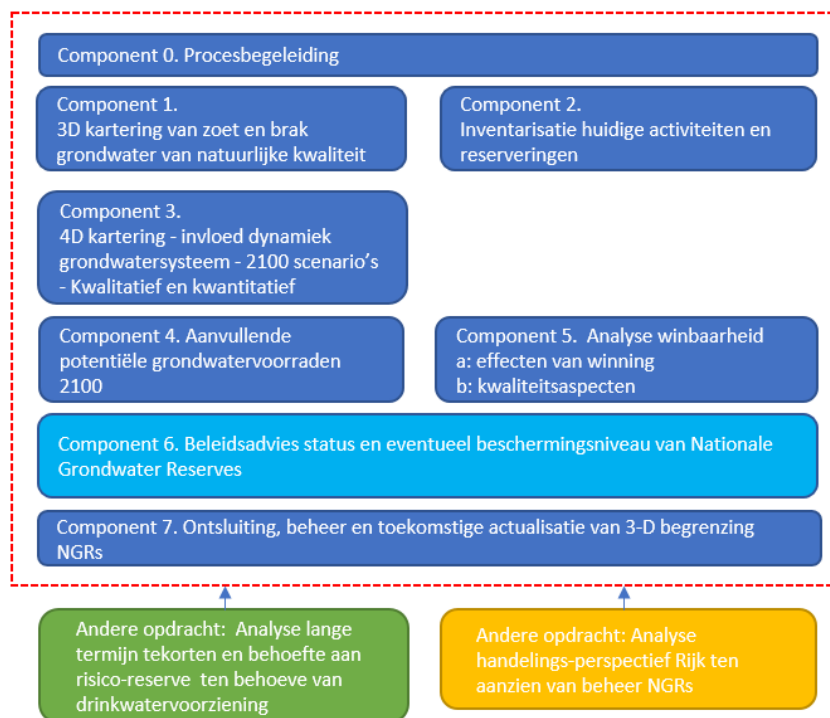
### Auteur(s)

	Perry de Louw (Deltares) Ilya America- van den Heuvel (Deltares) Bas Knaake (Deltares) Roel Melman (Deltares)	

# Samenvatting

In de Nota Drinkwater (2014) is het concept van Nationale Grondwater Reserves (NGRs) geïntroduceerd met als doel om natuurlijk kapitaal te beschermen ten behoeve van de drinkwatervoorziening in de verre toekomst en in geval van grootschalige en meerjarige crisissituaties. Dit in aanvulling op de Aanvullende Strategische Voorraden (ASVs) waar de provincies verantwoordelijk zijn voor het borgen van de bronnen voor de drinkwatervoorziening op de middellange termijn (2040). Een eerste zeer globale aanzet voor NGR gebieden is opgenomen in de structuurvisie ondergrond (STRONG 2018).

In 2022 heeft het ministerie van Infrastructuur en Water opdracht gegeven aan Deltares en TNO om een gedetailleerd 3D-beeld van de NGRs uit te voeren. Het project is opgedeeld in 7 componenten (zie Figuur 1.1).



Figuur 1.1. Samenvatting van de verschillende componenten van het project en relatie met andere uitgevoerde studies (groen en geel).

Dit document is de rapportage van component 4 (Potentiële aanvullende grondwatervoorraden 2100) van het project "3D-kartering Nationale Grondwater Reserves". De bouwstenen uit de componenten 1 tot 5 zijn ondersteunend voor het proces dat moet leiden tot een advies voor begrenzing van NGRs met een voorstel voor een gepast beschermingsregime afgestemd op het doel van de NGR (component 6).

Component 4 heeft als doel om mogelijke andere grondwatervoorraden zoals kwelwater uit polders, grondwater onder het IJsselmeergebied en veenplassen en het aanvullen van grondwatervoorraden via kunstmatige infiltratie of injectie in beeld te brengen. Het is van belang om een beeld te hebben van deze alternatieve bronnen, omdat hiermee de mogelijk toekomstige inzet van NGR beperkt kan worden. Er is gekeken naar fysieke mogelijkheden in termen van **hoeveelheden en effecten** op het grondwatersysteem en nadrukkelijk niet naar socio-economische haalbaarheid. Het betreft een verkenning op nationaal schaalniveau en dient als een eerste indruk van wat er potentieel mogelijk zou zijn. Deze eerste verkenning moet uitnodigen tot verder onderzoek dat uiteraard op een veel lokaler schaalniveau zou moeten plaatsvinden en veel meer elementen moet omvatten zoals omgevingseffecten en risicoanalyse, kosten-baten en maatschappelijk draagvlak. Bij de verkenning is gebruik gemaakt van modelberekeningen met het Landelijk Hydrologisch Instrumentarium (LHM) en LHM zoetzout. Het betreft nadrukkelijk een modelverkenning op nationale schaalniveau waarvan de resultaten voornamelijk als indicatief en niet absoluut dienen te worden geïnterpreteerd.

De modelverkenning laat zien dat alle drie de typen aanvullende voorraden in potentie kansrijk zijn.

### **Grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer**

De studie laat zien dat er 120-140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar of meer kan worden gewonnen zonder dat dit veel negatieve effecten heeft op het regionale grondwatersysteem van het IJsselmeergebied. Het grote voordeel van het onttrekken onder het IJsselmeer en Markermeer is dat er aanvulling vanuit de meren plaatsvindt zodat de negatieve effecten op het ondiepe grond- en oppervlaktewatersysteem worden gecompenseerd. De extra infiltratie vanuit het IJsselmeer en Markermeer als gevolg van de onttrekkingen is slechts zo'n 2% van de totale aanvoer door de IJssel in droge perioden waardoor grondwateronttrekking van beperkte invloed zijn op het waterpeilbeheer en de totale waterbalans in het IJsselmeer. Indien het IJsselmeergebied als aanvullende grondwatervoorraad in gebruik wordt genomen dient afgewogen te worden welk van de scenario's de meeste maatschappelijke en hydrologische voordelen oplevert en wat eventueel acceptabele negatieve effecten zijn. Ook is de technische haalbaarheid van de winningen van belang. Aangezien de scenario's uitgaan van winningen onder een waterbodembodem levert dit grotere uitdagingen op, bijvoorbeeld wat betreft benodigde infrastructuur ten opzichte van winning op land.

### **Kwelgebieden**

Bij *passieve kwelwaterwinning* wordt het kwelwater nadat het is uitgetreden in het oppervlaktewatersysteem samen met het neerslagoverschot gebruikt voor drinkwaterbereiding. Uit deze studie komen drie polders waar de kwelflux voldoende sterk is om jaarronde winning mogelijk te maken: dit zijn de Koekoekspolder, polder Horstermeer en de Bethunepolder. De potentie van deze kwelgebieden is samen 60 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Hiervan wordt een deel al benut met de winningen van de Bethunepolder Waternet. Een voordeel van deze winmethode is dat effecten op de omgeving erg beperkt zijn, maar een nadeel is dat het kwelwater mengt met het oppervlaktewater en het risico op verontreinigen daardoor hoger is. Overige gebieden zijn wellicht wel interessante plekken om in de winter in te zetten voor drinkwater productie als aanvulling op andere winningen bijvoorbeeld. Polders die hiervoor in aanmerking komen zijn: Tempelpolders, Vrouwenverdriet, Noordmeer en Bijlmermeer. In deze polders kan samen rond de 10 miljoen m<sup>3</sup> per jaar gewonnen worden gedurende de helft van het jaar.

#### *Actieve kwelwaterwinning in polders:*

Bij actieve kwelwinning wordt het grondwater onttrokken voordat het als brak-zout kwelwater in het oppervlaktewatersysteem uittreedt en hiermee tevens de zoutbelasting van de polder reduceert. Waternet onderzoekt momenteel de mogelijkheden om brak grondwater uit de Horstermeer te onttrekken en in te zetten voor drinkwaterbereiding. Uit deze studie blijkt dat onttrekkingen in sommige polders tot grotere grondwaterverlaging in de omgeving leiden dan bij andere polders. De locatie en het debiet van de winning hebben hier invloed op, maar ook het type kwelgebied en de lokale geohydrologie. Een aantal polders die in deze studie als mogelijk geschikt hiervoor worden aangemerkt zijn: polder Horstermeer, Waverveen, Purmer, Koekoekspolder en de Zuidplaspolder. Cumulatief leveren onttrekkingen in deze polders 16 miljoen m<sup>3</sup> water per jaar op geschikt voor de bereiding van drinkwater. Voor een aantal polders zorgt de diepe onttrekking ook tot een reductie van de zoutvrucht van ca. 20% tot 40%. Dit is een positieve bijvangst van deze onttrekkingstechniek.

#### *Onttrekkingen aan de voet van hoger gelegen heuvelruggen:*

De potentie van diepe onttrekkingen in kwelgebieden aan de voet van (zandige) infiltratiegebieden is verkend voor de Brabantse Wal en het Veluwemeer. Hoewel de modelering uitwijst dat in beide gebieden geschikt water (niet zout) kan worden gewonnen, zijn de effecten op de freatische grondwaterstanden en de kwelflux groot. Actieve grondwateronttrekkingen aan de voet van heuvelruggen zullen altijd leiden tot extra grondwaterstands dalingen en reductie van kwelstromen. Hierbij zullen ze mogelijk schade toebrengen aan natuur die afhankelijk is van hoge grondwaterstanden en kwel. Dit geldt in ieder geval voor de Brabantse Wal en daarmee wordt dit type winning hier niet geschikt geacht. Voor het kwelgebied aan het Veluwemeer zijn de effecten minder groot maar ook hier kunnen kwelafhankelijke ecosystemen negatief beïnvloed worden. Met minder grote onttrekkingen zijn er wellicht gebieden te vinden waar geen nadelige effecten op grondwaterafhankelijke natuur plaatsvinden en kunnen in potentie kansrijk zijn. Echter, in het algemeen kan gesteld worden dat grondwaterwinningen aan de voet van hoger gelegen heuvelruggen, niet kansrijk zijn als aanvullende bron voor drinkwaterwinning op de lange termijn. Als de kwel aan de voet van de heuvelrug passief kan worden gewonnen, dan kan het een potentieel interessante aanvullende bron zijn (oppervlaktewaterwinning).

#### *Onttrekkingen onder veenplassen:*

De modelresultaten van de winning van grondwater onder veenplassen laten zien dat de effectiviteit en de neveneffecten van de onttrekkingen sterk afhangen van de bodem- en deklaagweerstand onder de plassen. De Loosdrechtse en Vinkeveense plassen zijn geschikt voor een waterwinning, omdat de infiltratie van oppervlaktewater de onttrekking grotendeels dekt en de effecten op de omgeving daarmee beperkt zijn. Deze plassen staan namelijk deels in open verbinding met het eerste watervoerende pakket. Het winbare volume onder de Loosdrechtse en Vinkeveense plassen is ongeveer 20 tot 40 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Het is echter de vraag of een toename in de oppervlaktewater vraag gedurende de zomer in dit gebied gewenst is. De Reeuwijkse en Nieuwkoopse plassen zijn niet geschikt voor een waterwinning, omdat de infiltratie van oppervlaktewater onvoldoende is en de effecten op de grondwaterstand in de omgeving en het zoet-zout grensvlak groot zijn. De uitstralingseffecten zijn groot door de grote weerstand tussen de plassen en het eerste watervoerende pakket.

#### **Grootschalige kunstmatige infiltratie**

De gebieden met relatief diepe grondwaterstanden (dieper dan 2.5 m onder maaiveld) zijn geschikt voor het opslaan van grondwater door extra infiltratie. Het extra opgeslagen grondwater begint direct na infiltratie richting de ontwateringsmiddelen te stromen en wordt daarna afgevoerd. Hoe groter de afstand tot de ontwateringsmiddelen (en hoe lager de doorlatendheid), hoe langer dit grondwater kan worden vastgehouden. Gemiddeld voor de gebieden met een grondwaterstand dieper dan 2.5 m-mv, is na 3 jaar het extra volume aan opgeslagen water gehalveerd en na zeven jaar is er nog steeds een kwart van over.

Onder de Veluwe kan het water het langst worden vastgehouden omdat dit het grootste aaneengesloten gebied is zonder ontwatering. Het is tevens het gebied met de diepste grondwaterstanden en daarmee het meest kansrijk voor grootschalige kunstmatige infiltratie (ook wel MAR: Managed Aquifer Recharge).

Wanneer er twee keer zoveel wordt geïnfilteerd als onttrokken, treedt er slechts voor 5% van het gebied een grondwaterstands daling op. Voor het overige gebied stijgt de grondwaterstand en neemt de afvoer en kwel rondom de infiltratiegebieden toe. Dit kan voor de omgeving als zeer positief worden beschouwd. Slechts in een klein deel (5%) van het beïnvloed gebied neemt de grondwaterstand toe tot ongeveer 1.0 m-mv of ondieper en zou wateroverlast kunnen optreden. Een lagere infiltratieflex zou kunnen helpen om wateroverlast te voorkomen of het aanleggen van extra drainage.

De doorberekende modelvarianten geven een goed beeld van de potentie van MAR wanneer de helft van het infiltratievolume wordt onttrokken. De hoeveelheid die redelijkerwijs zonder noemenswaardige nadelige kwantitatieve effecten kan worden onttrokken ligt in de orde grootte van 140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, waarvan ongeveer de helft voor rekening komt van de Veluwe. Door de geringe effecten kan deze hoeveelheid van 140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar als een ondergrens worden gezien. In sommige gebieden is zeer waarschijnlijk meer mogelijk. Uiteraard zijn er een aantal belangrijke punten die veel meer aandacht verdienen wanneer voor een gebied de potentie van MAR nader wordt bepaald zoals:

- Beschikbaarheid van water voor infiltratie en transport van dit water richting de hoger gelegen infiltratieplassen, inclusief energiebehoefte hiervoor.
- Het ontwikkelen van infiltratieplassen vergt ruimte en dienen zo ingericht te worden dat ze in het landschap passen en een natuurfunctie kunnen vervullen.
- Beheer en onderhoud van infiltratieplassen.

Een extra belangrijk aandachtspunt is de kwaliteit van het te infiltreren water dat altijd een andere samenstelling heeft dan het ontvangende grondwater. Dit kan leiden tot ongewenste verandering van de grondwaterkwaliteit, ook wel aangeduid als vergrijzing van het grondwater. Vergrijzing van het grondwater door kunstmatige infiltratie van water kan worden voorkomen door voorzuivering of het gebruik van schone bronnen (bijv. opgevangen kwelwater).

In deze studie is niet de potentie van ASR modelmatig verkend maar is wel een geschiktheidskaart voor ASR vanuit het COASTAR project gepresenteerd.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>10</b>
1.1	Aanleiding en context	10
1.2	De relatie tussen de verschillende componenten	10
1.3	Proces	11
1.4	Werkwijze en opbouw van dit deelrapport	13
<b>2</b>	<b>Grondwater onder IJsselmeer en Markermeer</b>	<b>15</b>
2.1	Inleiding	15
2.2	Geohydrologische opbouw IJsselmeergebied	15
2.2.1	Geohydrologische basis	17
2.2.2	Ondergrondopbouw en ontstaansgeschiedenis	17
2.2.3	Holocene ontwikkeling	20
2.2.4	Geohydrologische schematisatie	23
2.2.5	Weerstand deklaag	25
2.2.6	Kwel/infiltratie	26
2.2.7	Beschikbaarheid zoet en brak grondwater	27
2.2.8	Zoutvrachten in de polders rondom het Markermeer en IJsselmeer	30
2.3	Methode	31
2.3.1	Overzicht modelvarianten	32
2.3.2	Modelinvoer	33
2.3.3	Gebiedsindeling voor aggregatie van resultaten	34
2.4	Resultaten	35
2.4.1	Grondwaterstanden en stijghoogtes	35
2.4.2	Kwel en infiltratieflux	37
2.4.3	Zoet-zout verdeling	38
2.4.4	Onttrekkingswater	42
2.4.5	Zoutbelasting	43
2.4.6	Reistijden	44
2.5	Conclusie en Discussie	46
2.5.1	Potentie van drinkwaterwinning onder het IJsselmeer	46
2.5.2	Andere factoren	48
<b>3</b>	<b>Potentie van kwelgebieden</b>	<b>49</b>
3.1	Inleiding	49
3.2	Type kwelgebieden en bestaande winningen	49
3.2.1	Kwel	49
3.2.2	Type kwelgebieden in Nederland	51
3.2.3	Winbaarheid van kwelwater	52
3.3	Methode	54
3.3.1	Modelinstrumentarium	55
3.3.2	Analyse kwel in Nederland	55



3.3.3	Analyse oppervlaktewater winning	57
3.3.4	Analyse diepe onttrekking	57
3.3.5	Analyse veenplassen	59
3.4	Resultaten oppervlaktewaterwinningen	61
3.4.1	Totale kwelvolume in de kustvlakte	61
3.4.2	Winbaarheid kwel	64
3.5	Resultaten grondwateronttrekkingen in kwelgebieden	67
3.5.1	Diepe polders	67
3.5.2	Kwelgebieden aangrenzend aan hogere zandgebieden: Veluwe en Brabantse Wal	75
3.5.3	Veenplassen	78
3.6	Conclusie en discussie	81
3.6.1	Oppervlaktewaterwinning in diepe kwelpolders	81
3.6.2	Onttrekkingen in diepe kwelpolders	81
3.6.3	Kwelgebieden aangrenzend aan hogere zandgebieden	84
3.6.4	Veenplassen	85
<b>4</b>	<b>Potentie van grootschalige kunstmatige infiltratie</b>	<b>86</b>
4.1	Inleiding	86
4.2	MAR en ASR nader beschouwd	86
4.2.1	MAR-systemen	86
4.2.2	ASR-systemen	92
4.3	Methode	95
4.4	Resultaten MAR-systemen	98
4.4.1	Watervasthoudend vermogen van de ondergrond (scenario S1)	98
4.4.2	Infiltratieplassen (scenario S2A en S2B)	103
4.4.3	Infiltreren en onttrekken (scenario S3A en S3B)	107
4.4.4	Infiltreren en onttrekken (scenario S4A)	110
4.5	Conclusie en discussie	112
<b>5</b>	<b>Conclusies potentiële aanvullende grondwatervoorraden</b>	<b>114</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>119</b>
<b>A</b>	<b>Begrippenlijst</b>	<b>122</b>
<b>B</b>	<b>Schematisatie onttrekkingen IJsselmeer</b>	<b>124</b>
<b>C</b>	<b>Extra resultaten voor IJsselmeer</b>	<b>125</b>
<b>D</b>	<b>Schematisatie onttrekkingen kwel</b>	<b>130</b>
<b>E</b>	<b>Extra resultaten voor kwel</b>	<b>131</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en context

In de Nota Drinkwater (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014) is het concept van Nationale Grondwater Reserves (NGRs) geïntroduceerd met als doel om natuurlijk kapitaal te beschermen ten behoeve van de drinkwatervoorziening in de verre toekomst en in geval van grootschalige en meerjarige crisissituaties. Dit is aanvulling op de Aanvullende Strategische Voorraden (ASVs) met als doel om bronnen voor de drinkwatervoorziening op de middellange termijn (2040) te borgen. Provincies zijn verantwoordelijk voor de ASVs.

Een eerste aanzet voor NGR gebieden is opgenomen in de Structuurvisie ondergrond (STRONG 2018). Het ministerie van Infrastructuur en Water (IenW) heeft nu behoefte aan een gedetailleerd 3 dimensionaal beeld van de NGRs, en heeft Deltares en TNO opdracht gegeven voor de werkzaamheden die uitgevoerd moeten worden om te komen tot dit 3D beeld. Deltares en TNO werken hierin nauw samen. Het project is opgedeeld in 8 componenten. De verschillende componenten / deelprojecten leveren de bouwstenen om uiteindelijk tot een advies over begrenzing en eventuele bijbehorende bescherming van NGRs te komen.

Voorliggende rapportage beschrijft de resultaten van *Component 4: Potentiële aanvullende grondwatervoorraden*.

## 1.2 De relatie tussen de verschillende componenten

In *component 1* wordt een 3D-kartering uitgevoerd van de grondwatervoorraden in de ondergrond van Nederland die in potentie geschikt zijn als NGR. Daarin worden onder andere de geohydrologische opbouw (doorlaatvermogen en weestand), de zoet-brak-zout grensvlakken en de ouderdom van het grondwater bekeken, zonder dat op basis van specifieke criteria al harde keuzes gemaakt worden over de begrenzing.

In *component 2* wordt een inventarisatie gemaakt van huidig gebruik en een inventarisatie van (mogelijk toekomstig) reserveringen waarmee rekening gehouden moet worden bij de begrenzing van de NGRs en/of de ontwikkeling van eventueel beleid om NGRs te beschermen. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om gebieden die in het kader van de energietransitie mogelijkheden bieden om geothermie te ontwikkelen.

Omdat het grondwatersysteem een dynamisch systeem is, kijken we in *component 3* ook naar de invloed van lange termijn ontwikkelingen op het grondwatersysteem (tijdshorizon 2100). We onderzoeken daarbij in hoeverre die ontwikkelingen van invloed kunnen zijn op de begrenzing en/of kwaliteit van de NGRs. Voorbeelden zijn:

- uitbreidingen in grondwateronttrekkingen (drinkwatervraag)
- klimaatscenario's, zeespiegelstijging, bodemdaling
- inrichting en landgebruik
- autonome verzilting
- lange termijn effecten van (beëindigen van) bruinkoolwinning

In *component 4* (dit rapport) onderzoeken we mogelijke andere grondwatervoorraden zoals kwelwater uit polders, grondwater onder het IJsselmeergebied en veenplassen en het aanvullen van grondwatervoorraden via kunstmatige infiltratie of injectie. Het is van belang om een beeld te hebben van deze alternatieve bronnen, omdat hiermee de mogelijk toekomstige inzet van NGRs beperkt kan worden.

In *component 5* wordt een analyse uitgevoerd naar de winbaarheid van de potentiële NGRs. Hierbij wordt rekening gehouden met toekomstige ontwikkelingen zoals bodemdaling en klimaatverandering (uit *component 3*) die de NGRs kunnen beïnvloeden.

De verschillende onderdelen van dit project moeten leiden tot een advies voor begrenzing van NGRs en een advies ten aanzien van bescherming van die reserves (*component 6*).

Om rekening te kunnen houden met de verschillende belangen is een brede klankbordgroep in het leven geroepen. *Component 0* gaat over het proces met de klankbordgroep.

*Component 7* gaat over de ontsluiting van de data en bestanden via een online viewer. Beide onderdelen lopen parallel met de andere componenten en worden niet afzonderlijke gerapporteerd.

Het NGR 3D-kartering project staat niet op zichzelf. Er zijn weliswaar grote volumes aan grondwater van goede kwaliteit aanwezig in de ondergrond, maar eventueel gebruik van deze voorraden heeft consequenties. Zo dragen grondwateronttrekkingen bij aan verdroging van natuur en vanuit die optiek wordt bijvoorbeeld in Noord-Brabant ingezet op een reductie van grondwateronttrekking. Inzet van NGRs voor de structurele drinkwatervoorziening op lange termijn ligt hier dus niet voor de hand. Omdat de druk op ons watersysteem toeneemt, zetten de drinkwaterbedrijven, provincies en het Rijk ook juist in op waterbesparing om de groei in drinkwatervraag te verminderen. Het is duidelijk dat we dus zuinig en slim met NGR voorraden om moeten gaan om onze omgeving niet onnodig te belasten en dit natuurlijk kapitaal ook voor toekomstige generaties beschikbaar te houden. Parallele initiatieven van het Rijk, provincies en/of drinkwaterbedrijven, gericht op bijvoorbeeld waterbesparing, gebruik van andere bronnen en strategische samenwerking geven hier invulling aan en beleid ten aanzien van eventueel toekomstige benutting van NGRs moet in die context beschouwd worden.

### 1.3 Proces

Het belang van goed drinkwater en de beschikbaarheid van voldoende bronnen van goede kwaliteit is evident groot. Provincies en drinkwaterbedrijven spelen hierin een belangrijke rol. Bescherming van grondwater legt echter ook belemmeringen op aan andere gebruiksfuncties aan maaiveld of in de ondergrond. Daarmee bestaat er bijvoorbeeld een spanningsveld tussen beschermen van grondwatervoorraden en het mogelijk maken van de energietransitie waarbij technieken als geothermie, gesloten en open bodemenergiesystemen steeds meer toegepast zullen worden.

Deltares en TNO voert de NGR studies uit in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) en het project wordt begeleid door een Begeleidingsgroep met vertegenwoordigers van IenW, Binnenlandse Zaken, het ministerie van Economische Zaken en Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). Gezien de verantwoordelijkheden en belangen van andere partijen is daarnaast een brede klankbordgroep in het leven geroepen. De klankbordgroep bestaat naast bovengenoemde organisaties uit vertegenwoordigers van elke provincie, elk drinkwaterbedrijf, koepelorganisaties zoals VNG, UvW, IPO en Vewin, de bodemenergie en geothermie sector en de Inspectie voor Transport en Leefomgeving.

De rol van de klankbordgroep is tweeledig: Enerzijds om optimaal gebruik te kunnen maken van de kennis die beschikbaar is bij partijen in de klankbordgroep. Hiertoe zijn op gezette momenten werksessies georganiseerd met de klankbordgroep. Daarnaast is het zaak om betrokken partijen zorgvuldig te informeren over het NGR traject en om feedback te vragen op de aanpak en (tussen)resultaten, om zodoende tot breed gedragen resultaten te komen. Hiervoor zijn gedurende de looptijd van het project een aantal klankbordgroep overleggen georganiseerd. In Tabel 1.1 hieronder is een overzicht gegeven van de bijeenkomsten in het eerste en tweede projectjaar.

Om de informatievoorziening tussen partijen te vergemakkelijken is in het project naast de normale communicatiekanalen ook gebruik gemaakt van een online omgeving (sharepoint) om eenvoudig bestanden uit te wisselen. Daarnaast draagt het ministerie van IenW vanaf het tweede projectjaar (2023) ter voorbereiding van de uiteindelijke besluitvorming ook zorg voor informatievoorziening op bestuurlijk niveau via het Bestuurlijk Overleg Water.

Tabel 1.1 Overzicht bijeenkomsten Klankbordgroep en Werksessies voor de periode maart 2022 t/m maart 2024.

Maand	Sessie	Doel bijeenkomst
Maart 2022	Klankbordgroep	Startoverleg; bespreken en aanscherpen aanpak
Mei 2022	Werksessie	Component 1: Vaststellen werkwijze 3D kartering, inclusief facultatieve verdiepingsslag voor regio specifieke zaken / differentiatie.
Juni 2022	Werksessie	Component 2: Inventarisatie activiteiten huidig en toekomstig gebruik/ beslag ondergrond.
Juni 2022	Klankbordgroep	Stand van zaken componenten 1, 2 en 3.
September 2022	Werksessie Noord Werksessie Zuid	Component 1: 3-D Kartering zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit - Bespreken conceptresultaten kartering, aanscherpen criteria en verdere aanpak.
November 2022	Klankbordgroep	Bespreken resultaten component 1, 2 en aanpak component 3.
November 2022	Werksessie	Component 3: Bespreken resultaten en inbreng klankbordgroep.
Januari 2023	Klankbordgroep	Bespreken eindresultaten componenten 1, 2 en 3. Vooruitblik naar werkzaamheden in tweede projectjaar.
Maart 2023	Werksessie	Gezamenlijk criteria vaststellen om de analyse winbaarheid uit te kunnen voeren en om tot technische begrenzing van de NGRs te komen, voor de 3 NGR-doelen (Natuurlijk kapitaal, calamiteiten en structurele drinkwaterwinning).
Juni 2023	Klankbordgroep	Bespreken voortgang van componenten 3, 4, 5, 6 en 7. Speciale aandacht voor eerste resultaten van component 4 (potentiële aanvullende voorraden).
Juli 2023	Werksessie	Bespreken aanpak en te gebruiken criteria voor de winbaarheid tav kwantiteit en kwaliteit.
September 2023	Klankbordgroep	Inloop uurtje – vragen over resultaten en status activiteiten.
Oktober 2023	Werksessie	Presenteren tussenresultaten van componenten 3,4 en 5. Vertaling analyse winbaarheid naar begrenzing NGRs en verkenning risico's voor NGRs en beleidsopties ter bescherming van NGRs.
November 2023	Werksessie	Bespreken conceptresultaten begrenzing NGRs en botsproeven.
Januari 2024 (in de planning)	Klankbordgroep	Bespreken resultaten uit opgeleverde rapporten voor componenten 3,4 en 5.
Februari 2024 (in de planning)	Werksessie	Bespreken eindresultaten begrenzing NGRs en beschermingsopties.

## 1.4 Werkwijze en opbouw van dit deelrapport

Naast de huidig bekende voorraden van de ASV's en het te karteren natuurlijk kapitaal aan grondwater zijn er nog andere grondwatervoorraden die mogelijk ingezet kunnen worden voor de drinkwatervoorziening op de lange termijn. Dit betreft daarmee voorraden die momenteel niet of nauwelijks worden gebruikt en meestal niet vallen onder het in component 1 gekarteerde natuurlijk kapitaal aan grondwater, omdat het bijvoorbeeld 'jonger' grondwater betreft. Soms is er enige overlap zoals het onttrekken van grondwater onder zoute kwelpolders dat ook deels als NGR kan worden aangemerkt.

In de vorige fase zijn drie mogelijke inzetbare voorraden geïdentificeerd: grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer, kunstmatige infiltratie en terugwinning, en kwelwater uit polders. Aanvullend zijn nog twee mogelijk aanvullende grondwatervoorraden geïdentificeerd: grondwater onder veenplassen en aan de voet van hoger gelegen zandgebieden. De potentie van deze voorraden zijn nader beschouwd op een nationaal niveau en worden in deze deelrapportage verder toegelicht.

**Grondwater IJsselmeer en Markermeer:** Onder het Markermeer en IJsselmeer, verder aangeduid als het IJsselmeergebied, bevindt zich een door infiltratie van oppervlaktewater uitdijende voorraad brak / zoet grondwater. Bij onttrekking, analoog aan oevergrondwaterwinning, zou grondwaterwinning onder het IJsselmeergebied gebruik kunnen maken van de grote buffer van zoet water uit het IJsselmeergebied. Daarbij wordt dan ook gebruik gemaakt van het zuiverend en filterend vermogen van de ondergrond. De mogelijkheden van het winnen onder het IJsselmeer worden besproken in [Hoofdstuk 2](#).

**Inzet van kwelwater:** Momenteel wordt het kwelwater uit de Bethunepolder al ingezet voor de drinkwaterbereiding door Waternet. Hierbij wordt het kwelwater nadat het is uitgetreden in het oppervlaktewatersysteem samen met het neerslagoverschot gebruikt voor drinkwaterbereiding. Dit type wordt in deze rapportage een passieve kwelwaterwinning genoemd. Daarnaast onderzoekt Waternet de mogelijkheden om brak grondwater uit de Horstermeer te onttrekken en in te zetten voor drinkwaterbereiding. Het betreft hier dus het onttrekken van grondwater voordat het als brak-zout kwelwater in het oppervlaktewatersysteem uittreedt en hiermee tevens de zoutbelasting van de polder reduceert. Dit type winning wordt in deze rapportage verder aangeduid als actieve kwelwinning.

Het winnen van kwelwater wordt in Hoofdstuk 3 besproken. In dit hoofdstuk worden ook de 2 extra geïdentificeerde bronnen besproken: grondwater onder veenplassen en het onttrekken van grondwater aan de voet van hoger gelegen zandruggen voordat het als kwelwater uittreedt. Voor de laatste bron worden twee voorbeelden besproken, namelijk kwel aan de voet van de Brabantse Wal en aan de voet van de Veluwe bij het randmeer.

**Kunstmatige infiltratie en terugwinning (benutten buffercapaciteit):** De beschikbare voorraad grondwater kan vergroot worden door kunstmatige infiltratie van water (ook wel Managed Aquifer Recharge, MAR<sup>1</sup>) met terugwinning. Daarbij worden twee vormen van MAR verder verkend:

- Infiltratie van water in gebieden met een dikke onverzadigde zone zoals onder de Veluwe ('Water Accu' / 'Nationale gieter') waarbij de ruimte voor extra voorraad boven de grondwaterspiegel wordt gezocht. Voor het gemak wordt dit in de rapportage verder als MAR aangeduid.
- Injectie van zoet water in watervoerende pakketten in brakke en zoute gebieden waarbij extra ruimte voor opslag wordt gezocht door het verdringen van brak- en zoutgrondwater en vervanging door zoet water. Deze vorm van MAR wordt ook Aquifer Storage and Recovery (ASR) genoemd.

Deze vormen van kunstmatige infiltratie van extra water worden in hoofdstuk 4 behandeld.

#### *Model verkenning op nationaal niveau*

In deze studie worden grondwatervoorraden verkend die mogelijk ingezet kunnen worden voor de drinkwatervoorziening op de lange termijn. We kijken daarbij alleen naar fysische mogelijkheden in termen van hoeveelheden en effecten op het grondwatersysteem en nadrukkelijk niet naar socio-economische haalbaarheid. Het betreft een verkenning op nationaal schaalniveau en dient als een eerste indruk van wat er potentieel mogelijk zou kunnen zijn. Deze eerste verkenning moet uitnodigen tot verder onderzoek dat uiteraard op een veel lokaler schaalniveau zou moeten plaatsvinden en veel meer elementen moet omvatten zoals omgevingseffecten en risicoanalyse, kosten-baten en maatschappelijk draagvlak.

Bij de verkenning maken we gebruik van modelberekeningen met het Landelijk Hydrologisch Instrumentarium (LHM). LHM is geschikt om verkenningen op nationaal niveau uit te voeren en bevat alle belangrijke processen die grondwaterstroming beïnvloeden. Het nationale schaalniveau van het model geeft echter direct aan dat de resultaten dus niet lokaal geïnterpreteerd kunnen worden. De modelcellen zijn relatief groot, 250 bij 250 meter, en wel 100 keer zo groot dan de meeste regionale grondwatermodellen die de meeste waterschappen gebruiken (cellen van 25 bij 25 meter). Processen die op een kleiner schaalniveau dan 250 bij 250 meter, zoals bijvoorbeeld grondwater-oppervlaktewater interactie, worden dus ook minder goed gesimuleerd.

Daarnaast zijn er onzekerheden in de modelinvoer die de resultaten beïnvloeden zoals de opbouw en hydraulische parameters van de ondergrond en de zoetzout-verdeling. De modelresultaten dienen dus voornamelijk als indicatief en niet absoluut te worden geïnterpreteerd.

---

<sup>1</sup> Managed Aquifer Recharge: techniek waarbij water kunstmatig geïnfiltreerd wordt en zodoende de grondwatervoorraad aanvult.

## 2 Grondwater onder IJsselmeer en Markermeer

### 2.1 Inleiding

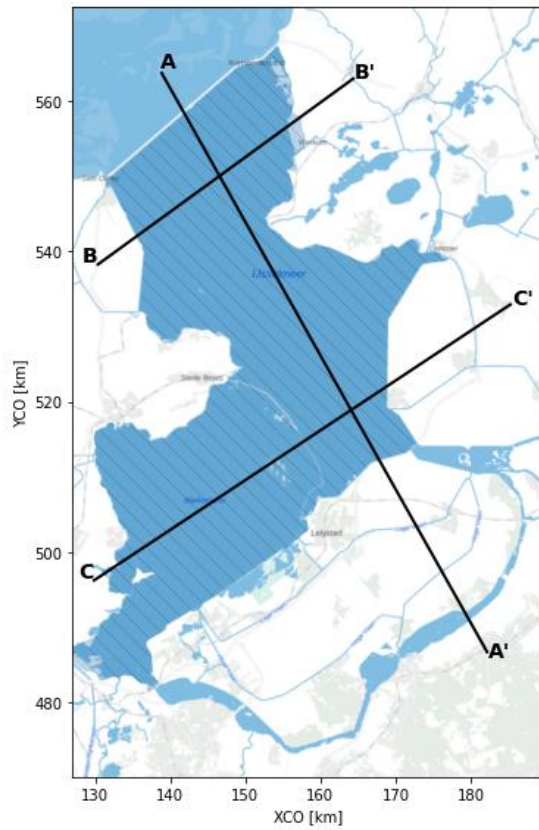
Onder het IJsselmeer en Markermeer, verder ook wel aangeduid als het IJsselmeergebied, bevindt zich een door infiltratie van oppervlaktewater uitdijende voorraad zoet tot brak grondwater. Dit grondwater wordt thans niet gebruikt door andere functies zoals landbouw en natuur en zou beschikbaar kunnen zijn voor drinkwaterwinning zonder dat het andere functies aan het oppervlak nadelig beïnvloed. De meeste grondwateronttrekkingen hebben namelijk wel nadelige effecten op het ondiepe (freatisch) systeem, immers elke druppel die wordt onttrokken moet van boven worden aangevuld. Bij grondwaterwinning in het IJsselmeergebied zou namelijk gebruik kunnen worden gemaakt van de grote buffer van zoet water uit de meren zelf. De grondwateronttrekkingen zullen namelijk leiden tot extra infiltratie van dit oppervlaktewater waarvan een constant peil wordt gehandhaafd. Daarnaast is dit water jaren onderweg voordat het uiteindelijk de putten bereikt en wordt het verder natuurlijk gezuiverd tijdens bodempassage.

Effecten van verschillende onttrekkingsscenario's worden berekend met het Landelijk Hydrologisch Model en in dit hoofdstuk besproken. Voordat de modelresultaten worden besproken, wordt eerst dieper ingegaan op de ontwikkeling en geohydrologie van het IJsselmeergebied. Er is nog relatief weinig onderzoek gedaan naar de grondwatersystemen onder het Markermeer en IJsselmeer.

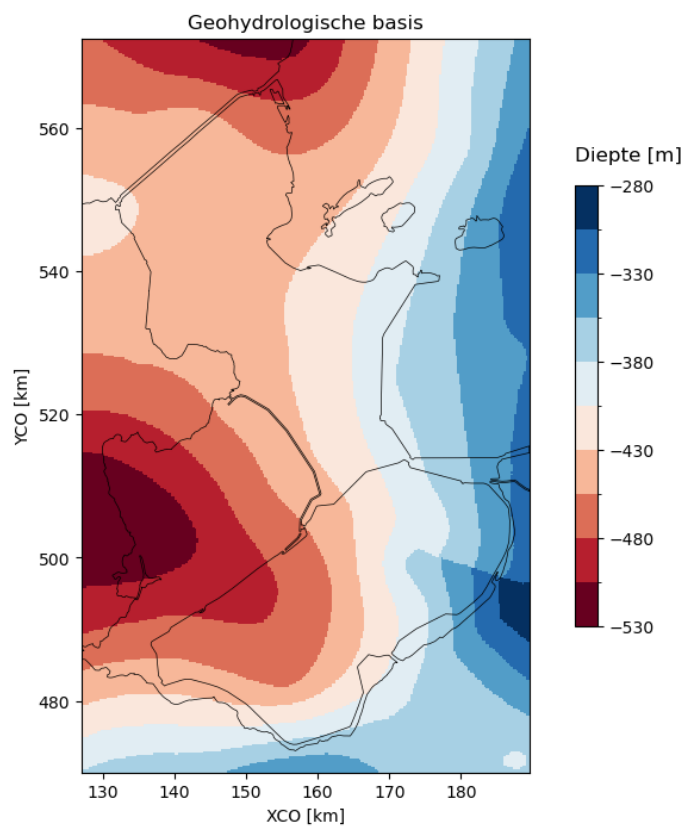
### 2.2 Geohydrologische opbouw IJsselmeergebied

De opbouw van de ondergrond heeft een grote invloed op het grondwatersysteem van het IJsselmeer, voor zowel de grondwaterstroming als de zoet-zout verdeling (het voorkomen en verdeling van zoet, brak of zout grondwater). Voor een beschrijving van het hydrologisch systeem wordt gebruik gemaakt van modeluitvoer van het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) en het meer gedetailleerde LHM zoet-zout (Delsman et al., 2023). Hiermee kan respectievelijk inzicht worden verkregen in grondwaterstromingen en zoet-zout verdelingen in de ondergrond. De ondergrond in het LHM is opgedeeld in modellagen die watervoerende pakketten representeren (zandig/grind pakket) en al dan niet gescheiden zijn door slecht doorlatende lagen (SDL; voornamelijk kleilagen) en is met name geschematiseerd op basis van REGIS-II (Hierna: REGIS). REGIS kent 128 geohydrologische eenheden, die te onderscheiden zijn in zandige, kleiige en complexe eenheden (conform Hummelman et al., 2019). Het LHM bestaat uit 8 modellagen waarin horizontale stroming optreedt en dus een (deel van een) watervoerend pakket betreft. De modellagen zijn al dan niet gescheiden door een slechtdoorlatend pakket. De bovenste modellaag (laag 1) betreft doorgaans de Holocene deklaag welke zowel watervoerend als slecht doorlatend is. Bij onderkant van de diepste modellaag 8 vormt de geohydrologische basis (GHB) van het model, hier wordt aangenomen dat er geen uitwisseling met nog diepere lagen mogelijk is.

Hieronder zal de geohydrologische opbouw van het gebied worden besproken op basis van REGIS-II en het LHM aan de hand van een drietal geohydrologische dwarsdoorsneden door het IJsselmeergebied (Figuur 2.1). Hierbij zal ook de geologische ontwikkeling van het gebied worden besproken met de meeste aandacht voor de relatief recente ontwikkeling in het Holoceen. Verder zal een beschrijving worden gegeven van het hydrologische systeem van het IJsselmeergebied.



Figuur 2.1. Locatie van het IJsselmeergebied (gearceerd) en de geohydrologische dwarsdoorsnedes.



Figuur 2.2. Diepte van de Geohydrologische Basis van het LHM.



### 2.2.1 Geohydrologische basis

De geohydrologische basis (GHB) onder het IJsselmeer bestaat uit slecht doorlatende kleiige afzettingen van de Formaties van Breda en Oosterhout (Figuur 2.4). Deze liggen op een diepte van ongeveer 400 meter in het zuidoosten van het IJsselmeer en de diepte neemt naar het westen toe tot ongeveer 450 meter (Figuur 2.2).

### 2.2.2 Ondergrondopbouw en ontstaansgeschiedenis

Het overgrote deel van de afzettingen zijn ontstaan gedurende de laatste 20 miljoen jaar als gevolg van mariene, fluviatiele, glaciale en eolische processen. Een overzicht van de belangrijkste formaties in het gebied, inclusief type afzetting en ouderdom, is gegeven in Figuur 2.3.

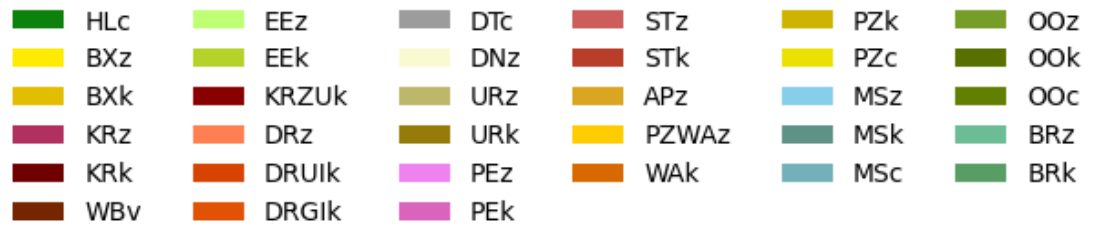
Chrono-stratigrafie (tijdschaal niet lineair)		Stratigrafische eenheden <b>Noordzee Supergroep (N)</b> op formatieniveau				
		Marien	Fluviatiel		Glaciaal	Overig
			Oostelijke rivieren	Rijn		
Kwartair	Holoceen	Formatie van Naaldwijk - NUNA				Formatie van Nieuwkoop - NUNI
		Eem Formatie - NUUE		Formatie van Kreftenheye - NUKR		Woudenberg - NUWB
	Pleistocene	Midden			Formatie van Urk - NUUR	Formatie van Drachten - NUDN
				Formatie van Appelscha - NUAP		Formatie van Peelo - NUPE
	Gelasien		Formatie van Peize - NUPZ	Formatie van Waalre - NUWA		
		Formatie van Maassluis - NUMS				
	Neogeen	Plioceen	Formatie van Oosterhout - NUOO			
		Mioceen	Formatie van Breda - NUBR			

TNO-GDN 2019/12

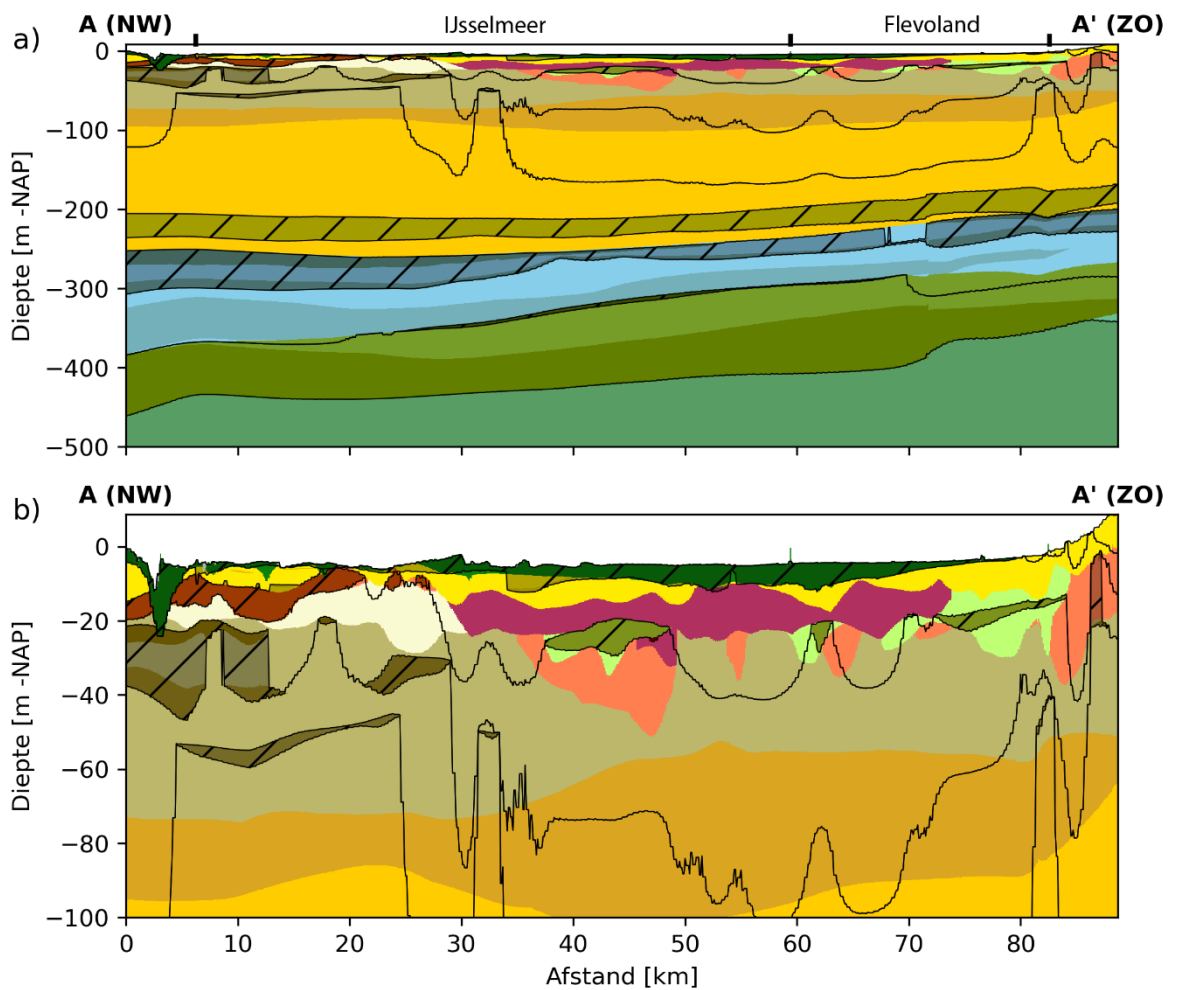
Figuur 2.3 Overzicht van de Nederlandse stratigrafische nomenclator met de relevante formaties (type afzetting + ouderdom) in de ondergrond van het IJsselmeergebied. Voor een uitgebreide beschrijving per formatie, zie <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator>.

De noord-zuid doorsnede van het IJsselmeer in Figuur 2.5 (zie Figuur 2.1 voor locatie) geeft een goed beeld van de algemene ondergrondopbouw van het IJsselmeer gebied tot en met de GHB. De diepste afzettingen in de profielen behoren tot de formaties van Breda en Oosterhout die respectievelijk zijn afgezet tijdens het Mioceen en Plioceen (Figuur 2.3). De kleiige afzettingen van deze formaties vormen de GHB en zijn hoofdzakelijk afgezet in ondiep marien milieu. De opbouw in het diepere deel van het profiel (-400 t/m -200 m diepte) laat een algemene overgang zien van een marien (Fm van Maassluis) naar een fluviatiel gedomineerd milieu (Fm van Peize en Waalre) als gevolg van een grootschalige mariene regressie in combinatie met een zich naar het noordwesten uitbouwende rivierdelta in het Noordzee bekken. Deze delta die met name worden gevormd door het Eridanos systeem (Oostelijke rivieren; Fm van Peize) en in veel mindere mate door de Rijn (Fm van Waalre).

Vanwege de in eerste instantie mariene condities tot en met de periode van de formatie van Maassluis, zal naar mate de overgang naar de formatie van Peize en Waalre vorderde, langzaam maar zeker een verzoeting van het grondwatersysteem hebben opgetreden.



Figuur 2.4. Legenda van de geohydrologische eenheden in de dwarsdoorsnedes A-A' (Figuur 2.5), B-B' (Figuur 2.8) en C-C' (Figuur 2.9). De geohydrologische eenheden bestaan uit zandige (z), kleiige (k) en complexe (c) eenheden (cf. Hummelman et al., 2019).



Figuur 2.5. Dwarsdoorsnede A-A' van noordwest naar zuidoost door het IJsselmeer van het REGIS-II model met daarbij de omlijnning van de modellagen met slecht doorlatende lagen (donker gearceerd) van het LHM voor (a) het complete grondwatersysteem tot en met de GHB en (b) ingezoomd op het ondiepe deel, de bovenste 100 meter, voor meer detail. Zie Figuur 2.1 voor de locatie en Figuur 2.4 voor de legenda.

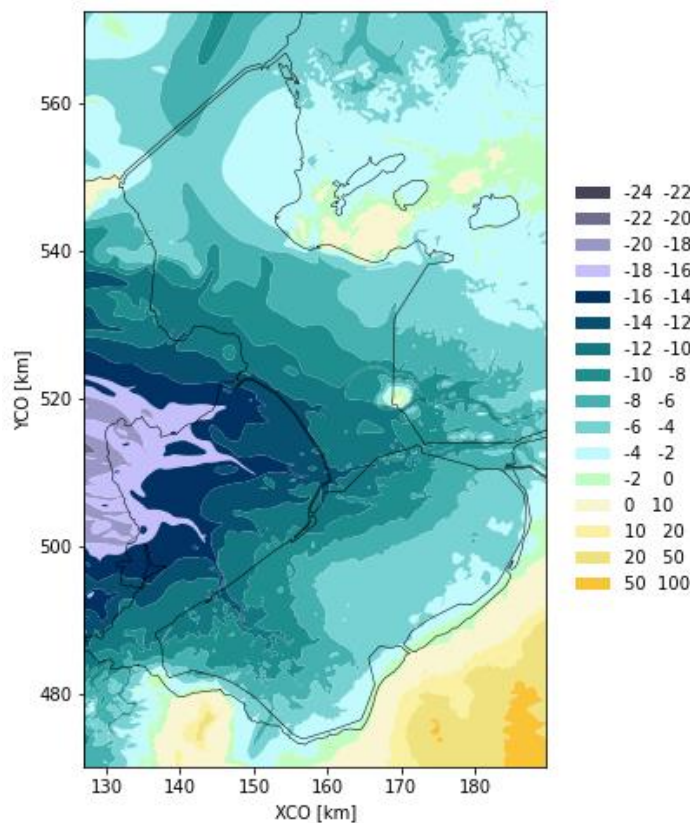
Tijdens het Vroeg Pleistoceen wordt de drainage van de riviersystemen in het gebied sterk bepaald door klimaatvariaties en resulterende zeespiegel veranderingen (Gibbard & Cohen, 2015; Gibbard and Lewin, 2016). Periodieke glaciaties zorgen voor een afname van sediment input van het Eridanos systeem (Overeem et al., 2001) dat gedurende het vroeg Midden Pleistoceen de afzettingen in het gebied domineert door afzettingen van de Oostelijke rivieren (Brongebied: Duitsland; Fm van Appelscha; Figuur 2.3). Dit zijn hoofdzakelijk zandige afzettingen van vlechtende riviersystemen en in het noord-zuid profiel komen deze met name voor op een diepte tussen de -60 en -90 m (Figuur 2.5). Tijdens het Midden Pleistoceen wordt de Rijn dominant in het gebied (Gibbard en Lewin, 2016) wat in het profiel terug te zien is aan dikke afzettingen van de Formatie van Urk tussen circa -20 en -70 meter diepte. Gedurende de koudere periodes vindt onder periglaciale omstandigheden ook afzetting plaats van de Formatie van Drachten. Dit zijn met name eolische zanden die zijn afgezet op droog gelegen vlaktes met weinig vegetatie en deze komen met name voor in het noordelijk deel van het IJsselmeer. Tijdens het Pleistoceen zorgen zeespiegel fluctuaties als gevolg van glaciaal-interglaciale cycli ervoor dat het gebied afwisselend ook onder invloed is van de zee (Laban, 1995). Hierdoor wisselen zich periodes af waar afwisselend verzoeting en verzilting van het grondwatersysteem optreedt.

Kenmerkend voor de ondergrond in het IJsselmeergebied is het grote verschil in de opbouw tussen het noordelijk deel, met een globale opeenvolging van de formaties van Urk, Drachten, Drenthe (Laagpakket v. Gieten) en Boxtel, en het zuidelijk deel met een globale opeenvolging van de Formaties van Urk, Drenthe, Eem, Kreftenheye en Boxtel (Figuur 2.5). Dit verschil heeft te maken met de ontwikkeling van het gebied vanaf het Midden Pleistoceen (<424 ka), voorafgaand aan de voorlaatste ijstijd, het Saalien. Tijdens deze periode stroomt de Rijn in noordwestelijke richting door het gebied, maar als gevolg van de uitbreiding van landijs in zuidelijke richting tijdens het Saalien, wordt de loop van de Rijn in westelijke richting afgebogen. Dit zorgt voor een samenvloeiing van de Rijn met een oost-west insnijdend proglaciaal rivierdal ten zuiden van het landijs (zie Peeters et al., 2015). De uitbreiding van het ijs zorgt in het gebied voor de vorming van grondmorene complexen en glaciaal uitgeschuurde bekkens (Peeters et al., 2015). Dit zorgt voor het verschil in ondergrondopbouw van het IJsselmeergebied. In het noordelijk deel: grondmorene complexen (Fm. van Drenthe, Laagpakket van Gieten) en in het zuidelijke deel: diep uitgeschuurde bekkens, opgevuld met voornamelijk zandige afzettingen van smeltwater rivieren (Fm. van Drenthe).

Na het smelten van het landijs aan het einde van het Saalien keert de Rijn terug naar een noordelijke loop (via het paleo-Vechtdal; zie Peeters et al. 2015). Dit is in profiel A-A' te zien aan het relatief kleine pakket fluviatiele afzettingen van de Formatie van Kreftenheye. Door zeespiegelstijging tijdens het Eemien neemt de invloed van de zee in het IJsselmeergebied steeds meer toe en verandert het dieper ingesneden Vechtdal in een estuarium grenzend aan de Eem zee. Tijdens deze periode worden veelal kleiige afzettingen van de Eem formatie afgezet. In profiel A-A' zijn deze afzettingen te herkennen op een diepte tussen de -15 en -30 meter. Tijdens de overgang naar de laatste ijstijd, het Weichselien, daalt als gevolg van het afkoelende klimaat de zeespiegel. De Rijn behoudt haar loop door het Vechtdal en wordt wederom dominant in het zuidelijke deel van het IJsselmeergebied (Busschers et al., 2007). Dit zorgt voor wijdverbreide erosie van de Eem formatie en afzetting van een dik pakket zandige en grindige afzettingen van de Formatie van Kreftenheye. Tijdens het midden Weichselien wordt de noordelijke loop van de Rijn verlaten en veranderd het IJsselmeergebied hoofdzakelijk in een droge vlakte met weinig vegetatie. Tijdens deze periode worden met name eolische zanden afgezet (Profiel A-A', Fm van Boxtel; Figuur 2.5).

### 2.2.3 Holocene ontwikkeling

Tijdens het begin van het Holoceen is de topografie van het gebied een bepalende factor voor het verdere ontstaan van het IJsselmeergebied als gevolg van de midden-Holocene transgressie (Pierik et al., 2018). Deze in algemeen westelijke richting hellende topografie wordt gekenmerkt door het dieper gelegen paleo-Vechtdal in het zuidelijke deel van het IJsselmeergebied (Figuur 2.6). Verdrinking van dit dal als gevolg van zeespiegelstijging tijdens het Holoceen en afwezigheid van grote riviersystemen, zoals de zuidelijker gelegen Rijn en Maas, zorgen ervoor dat het getij ver landinwaarts kan komen tot aan de hedendaagse Noordoostpolder (**Error! Reference source not found.** 2.7). In eerste instantie vindt langs de flanken van het dal veenvorming plaats door verdrinking van het landoppervlak als gevolg van stijgende grondwaterstanden, gestuurd door de zeespiegelstijging. Tot en met 3850 voor Christus ontwikkelt het voormalige Vechtdal zich tot een marien gedomineerd getijdengebied met aan de flanken van het dal een landwaartse overgang naar een veengebied, wat indicatief is voor zoetwater condities (**Error! Reference source not found.** 2.7). De ligging van veenlagen is zeer van belang voor de verzilting van het grondwatersysteem in het gebied omdat dit betekent dat zout oppervlaktewater wel of niet in contact staat met goed doorlatende oudere zandige afzettingen (Oude Essink et al., 2008). Tijdens deze periode treedt de belangrijkste verzilting van de ondergrond op en een groot deel van het zoute grondwater in de bovenste 200 meter van de ondergrond is hieraan toe te schrijven (Oude Essink et al., 2008).

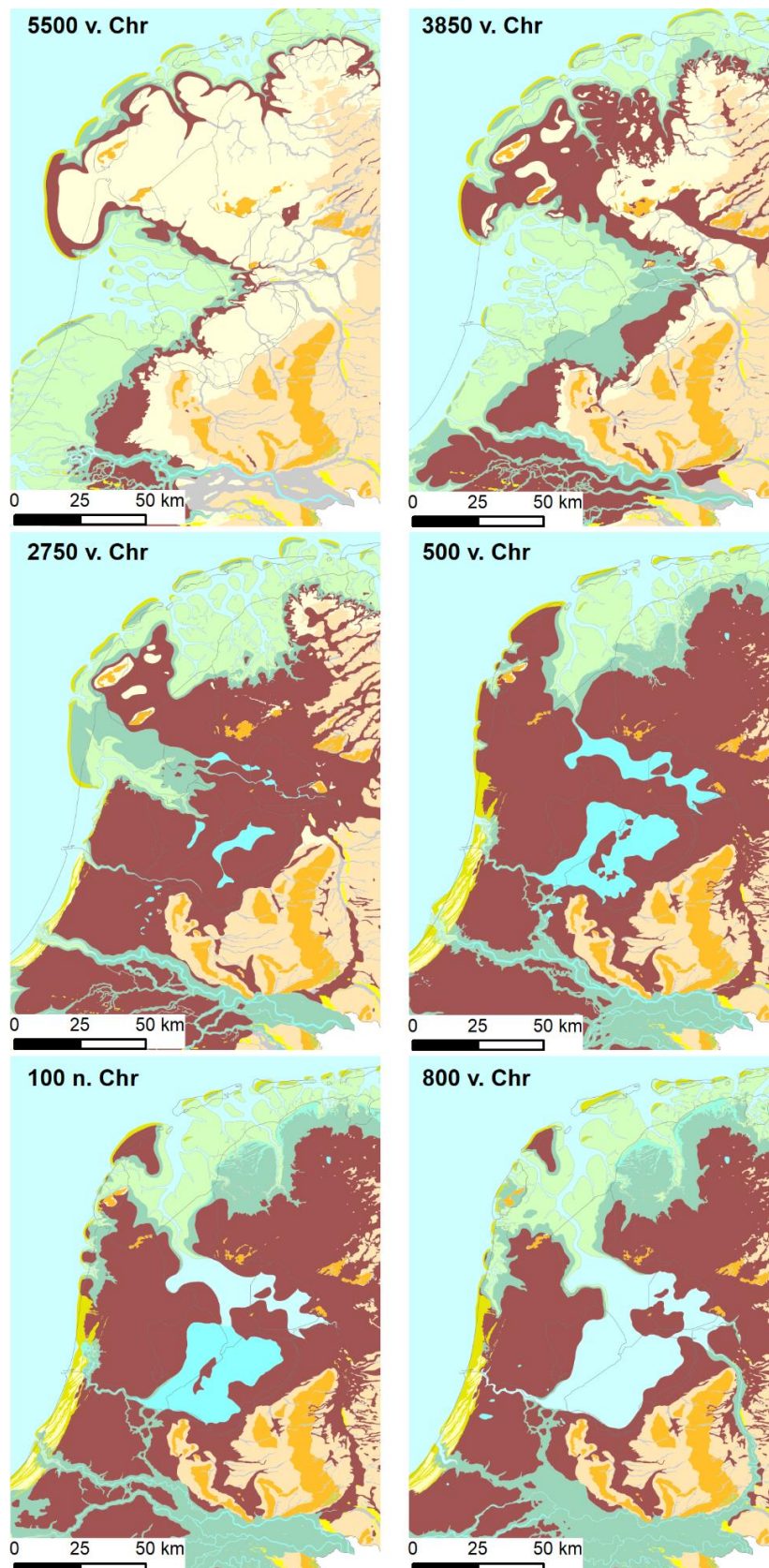


Figuur 2.6. Hoogte reconstructie van het Pleistocene landoppervlak in het IJsselmeergebied aan het begin van het Holoceen (Vos et al., 2015).

Dankzij een afnemende snelheid van de zeespiegelstijging vanaf circa 6000 jaar geleden vormt zich langs de westkust van de Nederland een strandwal die de kust afsluit waardoor de invloed van zee en getij in het IJsselmeergebied afneemt (Beets en van der Spek, 2000). Hierdoor vindt landinwaarts van de strandwal grootschalige veenvorming plaats (**Error! Reference source not found.** 2.7). In het zuidelijk deel van het IJsselmeergebied bleef echter een meer achter omgeven door veengebieden: het Flevomeer (**Error! Reference source not found.** 2.7, 500 v. Chr.; Pierik et al., 2018). Drainage van dit meer vond in eerste instantie plaats naar het westen, via het Oer IJ systeem maar gedurende het Holoceen verschuift dit noordwaarts in de richting van de Waddenzee door de vorming van de Vlie (Vos et al., 2015). Vanaf 100 na Christus zorgt deze ontwikkeling ervoor dat het IJsselmeergebied vanuit het noorden weer in verbinding met de zee komt te staan (Zuiderzeefase, **Error! Reference source not found.** Ook ontstaat in deze periode de rivier de IJssel die vanaf het zuiden zoet water richting het IJsselmeer brengt. Hierdoor ontstaat een sterke zoet/zout gradiënt in de Zuiderzee lagune (Oude Essink et al., 2008). Omdat in het noordelijk deel van het IJsselmeergebied de Holocene deklaag een geringe dikte heeft (Figuur 2.5 en Figuur 2.8) kan het zoute water relatief makkelijk infiltreren in de bovenste lagen.

De Holocene transgressie is maximaal ongeveer tot de grens van Flevoland gekomen, met de westelijke helft van Flevoland als intergetijdengebied. Het grondwatersysteem zal in deze periode sterk zijn verzilt. In de daaropvolgende periode met veenuitbreiding zal zoet water zijn geïnfiltreerd, bovenop het zoute zeewater. De Zuiderzee heeft slechts enkele eeuwen bestaan, een periode waarin zout water in de ondergrond is geïnfiltreerd. Aanwezige kleilagen en de grondwater toestroom vanuit de Veluwe belemmerde deze infiltratie in het oosten. Door menging met het eerder geïnfiltreerde water vanuit het veengebied zal het brakke grondwater zijn ontstaan, dat terug te zien is in de metingen op 50 m diepte van net na de inpoldering van Flevoland (zie paragraaf 2.2.7).

Door de aanleg van de afsluitdijk werd het hele IJsselmeergebied afgesloten van de zee (1932) en werd door aanvoer van zoet water door rivier en beeksystemen (bijv. IJssel, Overijsselse Vecht, Tjonger, Eem) het IJsselmeer een zoetwater meer. Sindsdien treedt hierdoor verzoeting op in het bovenste deel van het grondwatersysteem. Latere inpoldering van grote gebieden zorgden voor grote stijghoogteverschillen tussen het IJsselmeer en de nabijgelegen polders en voor infiltratie van zoetwater en verzoeting in het bovenste deel van het grondwatersysteem.



Figuur 2.7. Paleogeografische ontwikkeling van het gebied van circa 5500 voor Christus, tot 800 na Christus (Vos et al., 2015).

#### 2.2.4 Geohydrologische schematisatie

Boven de GHB is de ondergrond onder het IJsselmeer globaal in drieën te delen: (1) een diep deel bestaande uit een afwisseling van relatief dunne watervoerende pakketten en dikke slecht doorlatende lagen, (2) tussen -200 en -100 meter diepte een dik watervoerend pakket en (3) een ondiep, relatief heterogeen gedeelte tussen -100 meter diepte en maaiveld (Figuur 2.5, Figuur 2.8 en Figuur 2.9).

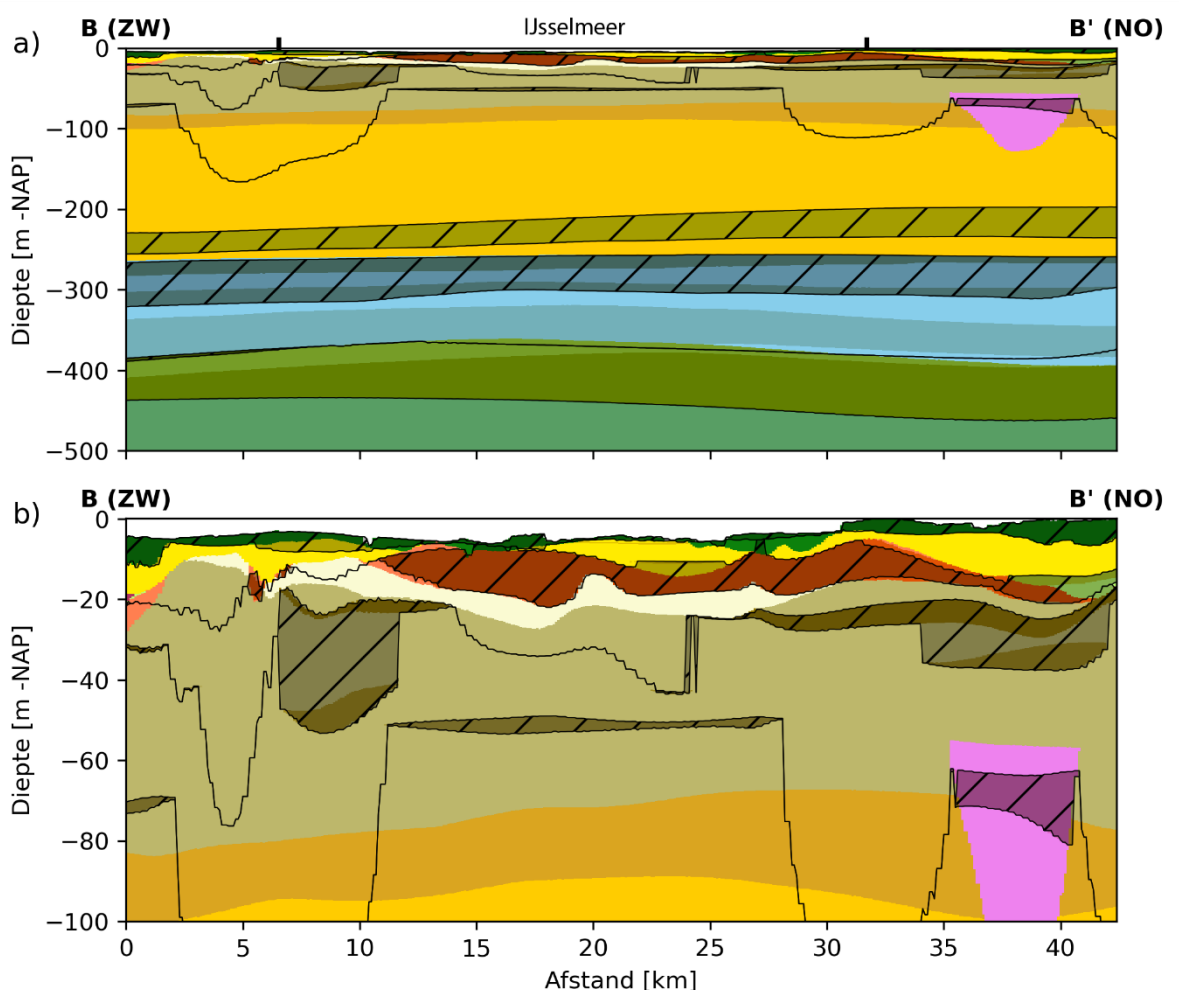
De ondergrond vanaf de GHB tot aan maaiveld wordt door het Landelijke Hydrologisch Model onderverdeeld door 8 modellagen die hieronder aangeduid met modellaag 1 t/m 8. Soms zijn de modellagen gescheiden door slecht doorlatende lagen (SDL) en soms niet waardoor ze met andere modellagen één watervoerend pakket vormen.

In het diepe deel van de ondergrond boven de GHB bevindt zich modellaag 8 dat voornamelijk bestaat uit fijn tot zeer grof zandige (105-420  $\mu\text{m}$ ) mariene afzettingen van de Formatie van Oosterhout. In het noordelijk deel van het IJsselmeer is de dikte van de zandige afzettingen in modellaag 8 beperkt tot circa 20 meter maar naar het zuidoosten neemt de dikte toe tot ongeveer 80 meter. Boven modellaag 8 ligt modellaag 7 dat bestaat uit iets fijner zandige (uiterst fijn tot matig grof; 63-300  $\mu\text{m}$ ) mariene afzettingen van de Formatie van Maassluis (MS; Figuur 2.4). Modellaag 8 wordt lokaal gescheiden van modellaag 7 door de zeer dunne SDL7. SDL7 is in grote delen van het IJsselmeergebied afwezig (Figuur 2.5 en Figuur 2.8), maar komt lokaal voor als OOk1. In zowel modellaag 7 als modellaag 8 komen dikke kleilagen voor, die niet zijn geschematiseerd als SDL in het LHM maar waardoor weinig stroming tussen de modellagen 7 en 8 plaatsvindt.

Boven modellaag 7 worden de doorsnedes gekenmerkt door twee relatief dikke slecht doorlatende lagen (SDL6 en SDL5) die voorkomen door vrijwel het gehele IJsselmeer gebied. SDL6 en SDL5 hebben een redelijk constante dikte, respectievelijk van ongeveer 50 en 30 meter. SDL6 bestaat uit de bovenste kleiige afzettingen van de Formatie van Maassluis (MSk1) en komt voor op een diepte tussen ongeveer -250 en -300 meter (Figuur 2.5). SDL5 bestaat uit complexe afzettingen (klei, zand en veen) van de Formatie van Peize (PZc; Figuur 2.4) en komt ongeveer voor op een diepte tussen -200 en -230 meter (Figuur 2.5). Tussen SDL6 en SDL5 bevindt zich modellaag 6 bestaande uit matig tot zeer grof zandige fluviatiele afzettingen van de Formatie van Peize en Waalre (PZWA; Figuur 2.4) met een relatief constante dikte van ongeveer 20 meter (Figuur 2.5).

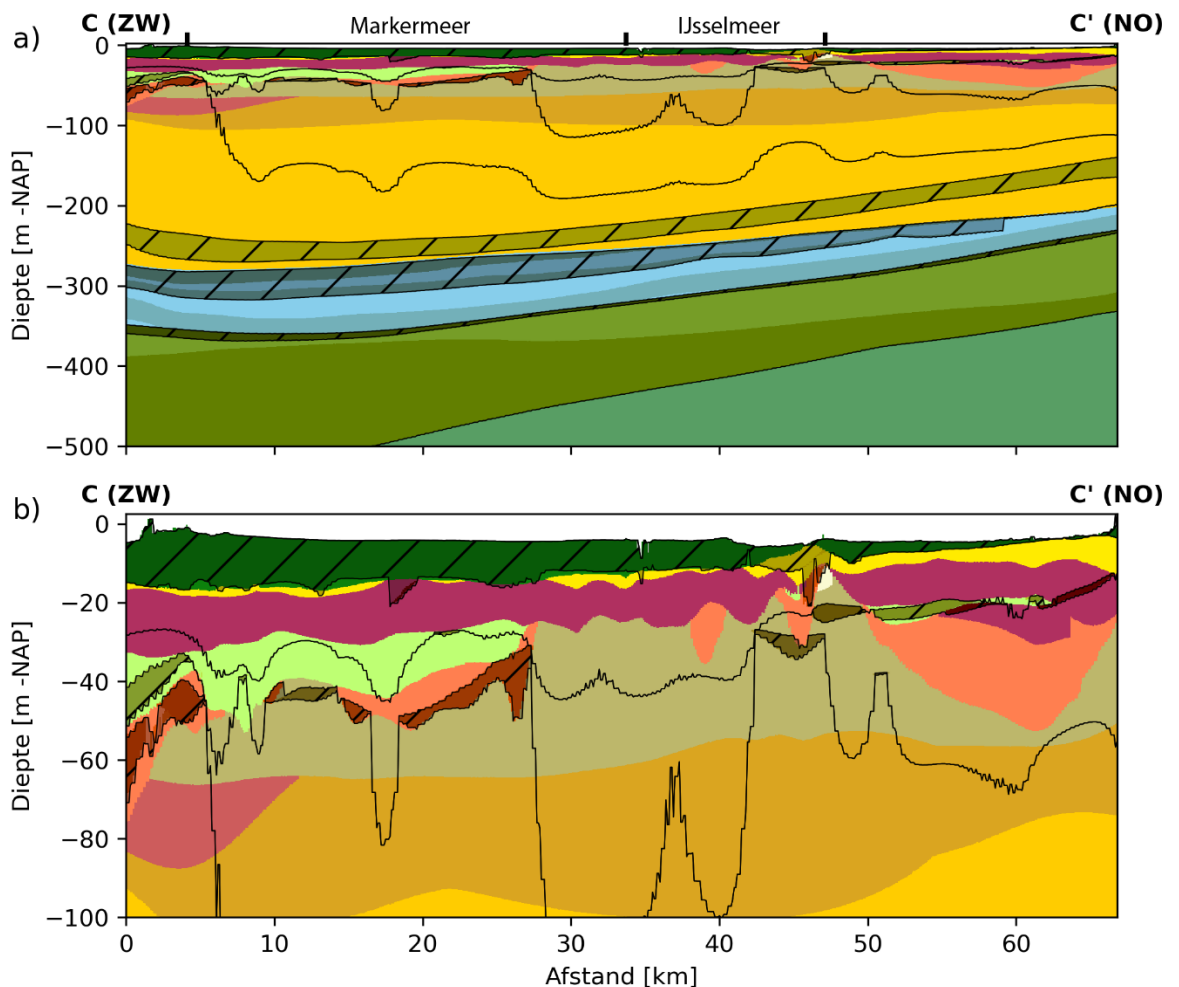
Boven SDL5, ondieper dan -200 meter, vormen meerdere LHM lagen samen een dik watervoerend pakket voor die lokaal gescheiden wordt door een SDL. Aan de basis bestaat dit modellaag uit matig tot zeer grof zandige afzettingen van de Formatie van Peize en Waalre met een dikte variërend van ongeveer 80 tot meer dan 100 meter. Richting het ondiepe deel van het profiel (0 tot -100 m diepte) liggen bovenop de Formatie van Peize-Waalre jongere fluviaatiele afzettingen van de Formatie van Appelscha. Deze afzettingen hebben een dikte van ongeveer 30 tot 50 meter.

Binnen het ondiepe deel van de ondergrond (bovenste 100 m) komt het eerder besproken verschil in opbouw tussen het noordelijke en zuidelijke deel van het IJsselmeer (sectie 2.2.2) terug in de geohydrologische schematisatie. Het noordelijke deel (Figuur 2.8) wordt gekenmerkt door een dik voorkomen van SDL2 welke voornamelijk bestaat uit keileem afzettingen van de Formatie van Drenthe, Laagpakket van Gieten. In het noordelijk deel is de dikte van de Holocene deklaag (modellaag 1) zeer gering. In het zuidelijk deel (Figuur 2.9) is SDL2 grotendeels afwezig en heeft de Holocene deklaag een meer aanzienlijke dikte. Over het algemeen bestaat de Holocene deklaag uit slecht doorlatende sedimenten zoals klei en veen afgewisseld met zandige lagen.



Figuur 2.8. Dwarsdoorsnede B-B' van zuidwest naar noordoost door het noordelijke deel van het IJsselmeer van het REGIS-II model met daarbij de omlijnning van de modellagen met slecht doorlatende lagen (donker gearceerd) van het LHM voor (a) het complete grondwatersysteem tot en met de GHB en (b) ingezoomd op het ondiepe deel, de bovenste 100 meter, voor meer detail. Zie Figuur 2.1 voor de locatie en Figuur 2.4 voor de legenda.

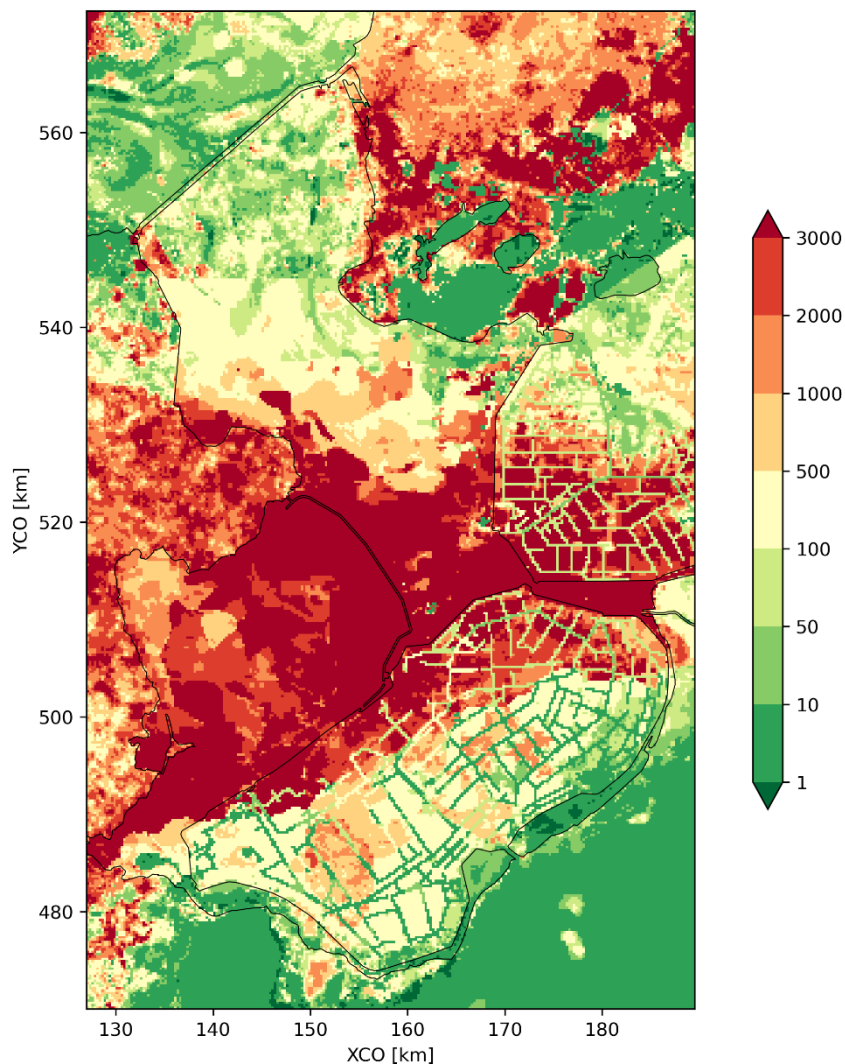




Figuur 2.9. Dwarsdoorsnede C-C' van zuidwest naar noordoost door het zuidelijke deel van het IJsselmeer van het REGIS-II model met daarbij de omlijning van de modellagen met slecht doorlatende lagen (donker gearceerd) van het LHM voor (a) het complete grondwatersysteem tot en met de GHB en (b) ingezoomd op het ondiepe deel, de bovenste 100 meter, voor meer detail. Zie Figuur 2.1 voor de locatie en Figuur 2.4 voor de legenda.

### 2.2.5 Weerstand deklaag

De karakteristieken van de deklaag spelen een belangrijke rol bij kwel- en infiltratie en daarmee in de zoet-zout verdeling in het IJsselmeergebied. De samenstelling en dikte van de deklaag bepaalt de verticale weerstand (c-waarde). Meer kleiige en venige afzettingen leiden tot een grotere weerstand voor grondwaterstroming. In het IJsselmeergebied zijn de verschillen in verticale weerstand vrij groot: van 50-500 dagen in het noordelijk deel tot meer dan 2000 dagen in het zuidelijk deel van het IJsselmeer en grootste deel van het Markermeer (Figuur 2.10). Deze verschillen worden met name veroorzaakt door de dikte van deklaag. Naarmate deze toeneemt (N.B. in het Markermeer en zuidelijke deel IJsselmeer), neemt ook de verticale weerstand toe en vice versa. Dit is met name goed te zien in het ondiepe deel (de ondiepe 100 m) van de profielen B-B' en C-C': een dunne deklaag in profiel B-B' en een dikke deklaag in C-C'.

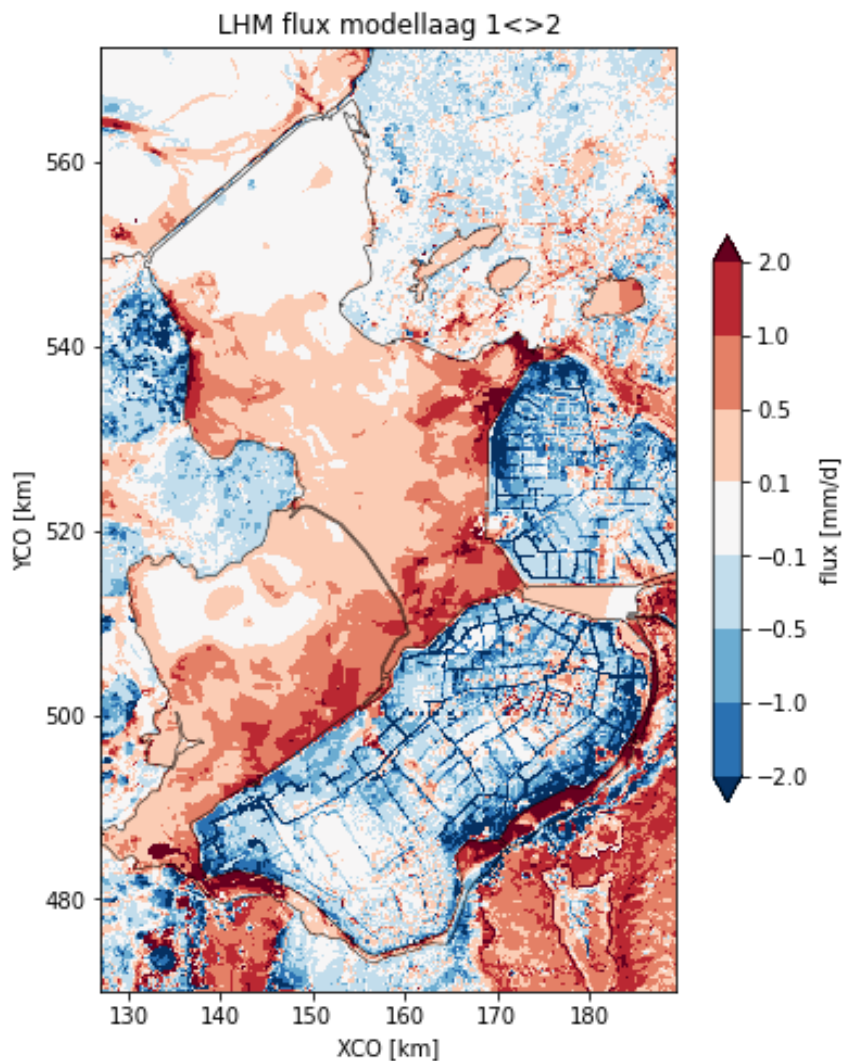


Figuur 2.10. Weerstand deklaag (in dagen)

### 2.2.6 Kwel/infiltratie

Kwel en infiltratie spelen een belangrijke rol in de zoet-zout verdeling van de watervoerende pakketten. Kwel wordt hier gedefinieerd als stroming van grondwater vanuit het eerste watervoerende pakket onder de deklaag naar het oppervlak dat uitreedt in het IJsselmeer of drainagebuizen en slootjes. Bij infiltratie is dit omgekeerd en stroomt grondwater naar het eerste watervoerende pakket. Met behulp van LHM zijn de kwel/infiltratie fluxen in beeld gebracht voor het IJsselmeergebied (Figuur 2.11). Hierin valt op dat er een aantal zones zijn waar sterke infiltratie optreedt: het zuidoostelijke en westelijke deel van het IJsselmeer en het zuidelijke deel van het Markermeer. Deze zones komen met name voor langs omliggende diepe polders en lokaal komen infiltratie fluxen voor van meer dan 2 millimeter per dag. Met name in dieper gelegen delen van de Noordoost- en Wieringermeerpolders treedt sterke kwel op (>2 mm/d) langs de infiltratiezones. Het lage polderpeil (van -4.5 tot -6.5 m NAP) leidt tot flinke kwel in de diepe polders en verlagen de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket aanzienlijk resulterend in hoge infiltratiefluxen grenzend aan de diepe kwelpolders. De invloed van diepe polders op de infiltratie van het IJsselmeer werkt tot 10 km ver door in het IJsselmeer grenzend aan de Flevopolders en tot 5 km ten oosten van de Wieringermeerpolder.

In het grootste deel van het IJsselmeer en Markermeer, het deel dat niet of nauwelijks door de diepe polders wordt beïnvloed, treedt infiltratie op met lage fluxen tussen 0.1 en 0.5 millimeter per dag. Dit is in lijn der verwachting vanwege het relatief constante peil van het IJsselmeer en Markermeer over een zeer groot oppervlak waardoor er nauwelijks stijghoogteverschillen ontstaan. Opvallend zijn twee delen in het noorden van het IJsselmeer en midden van het Markermeer, ver verwijderd van de diepe polders, waar vrijwel geen kwel/infiltratie optreedt.



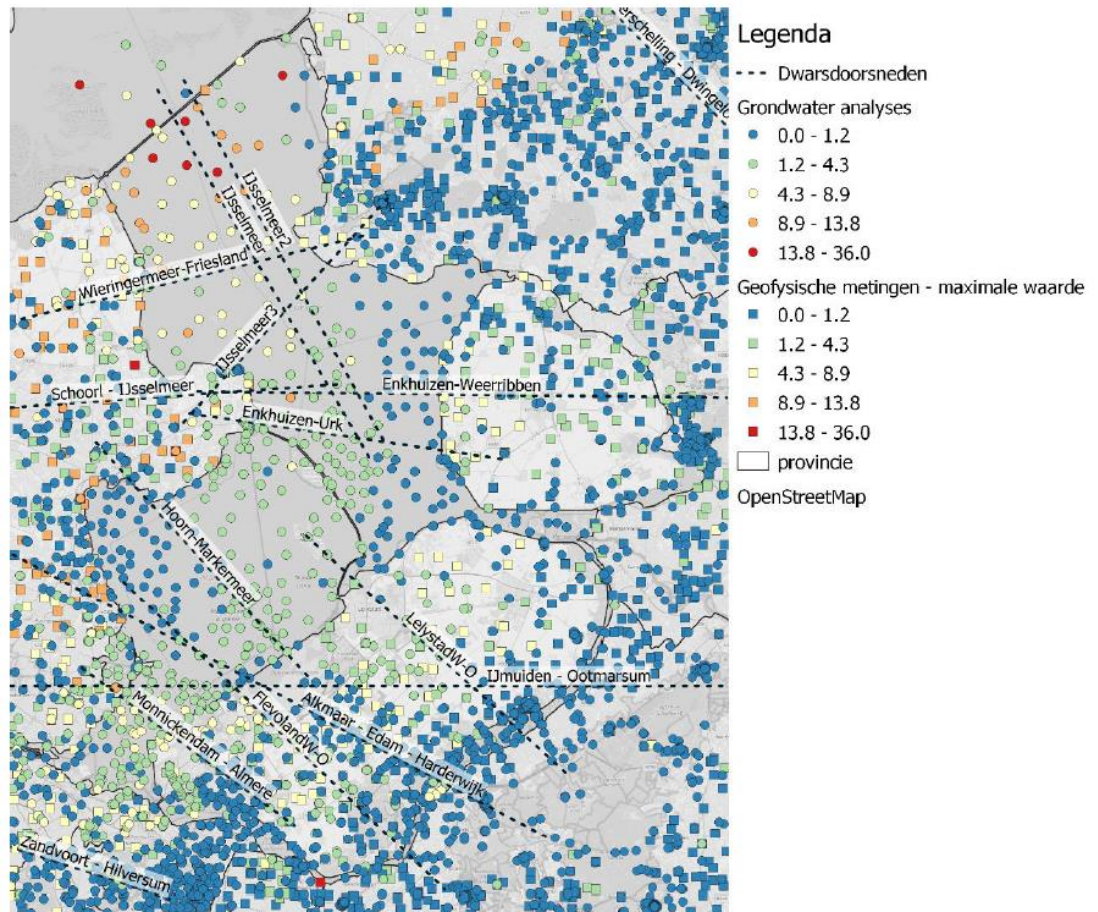
*Figuur 2.11. Berekende flux tussen modellaag 1 en 2 van het Landelijk Hydrologisch Model ter illustratie van kwel (blauw) en infiltratie (rood) van grondwater.*

### 2.2.7 Beschikbaarheid zoet en brak grondwater

Het grondwater onder het IJsselmeergebied is veelal brak tot zout en dit is afkomstig van de Holocene transgressies toen het gebied onder invloed stond van de zee (zie paragraaf 2.2.3).

De huidige verdeling van zoet tot en met brak grondwater tot en met mogelijk winbare dieptes in het IJsselmeergebied is in beeld gebracht met behulp van het LHM zoet-zout model (Figuur 2.13, Figuur 2.14 en Figuur 2.15). Hierbij dient te worden opgemerkt dat er grote onzekerheden zijn in de zoutverdeling van de ondergrond van het IJsselmeergebied door het geringe aantal metingen dat beschikbaar is. Figuur 2.12 geeft de locaties aan van de metingen die zijn gebruikt voor het afleiden van de initiële chlorideverdeling van het LHM zoet-zout model (Delsman, 2020). In het IJsselmeer / Markermeer zijn de nodige metingen aanwezig, maar deze beperken zich tot de bovenste 50 m. Het betreft vrijwel zonder

uitzondering metingen (chlorideanalyses) op één tijdstip op een tweetal verschillende diepten. De metingen in het IJsselmeer en Markermeer zijn uitgevoerd tussen de jaren 60 en 80, op land zijn er ook recentere metingen beschikbaar. Deze metingen dateren dus van kort na de drooglegging van de zuidelijke Flevopolder. Van de chlorideverdeling onder het IJsselmeer en Markermeer zijn daarmee op grotere diepte weinig harde gegevens bekend.



Figuur 2.12. Metingen gebruikt voor afleiden initiële chlorideverdeling (in g/l) in en rond het IJsselmeer / Markermeer (uit Delsman, 2020).

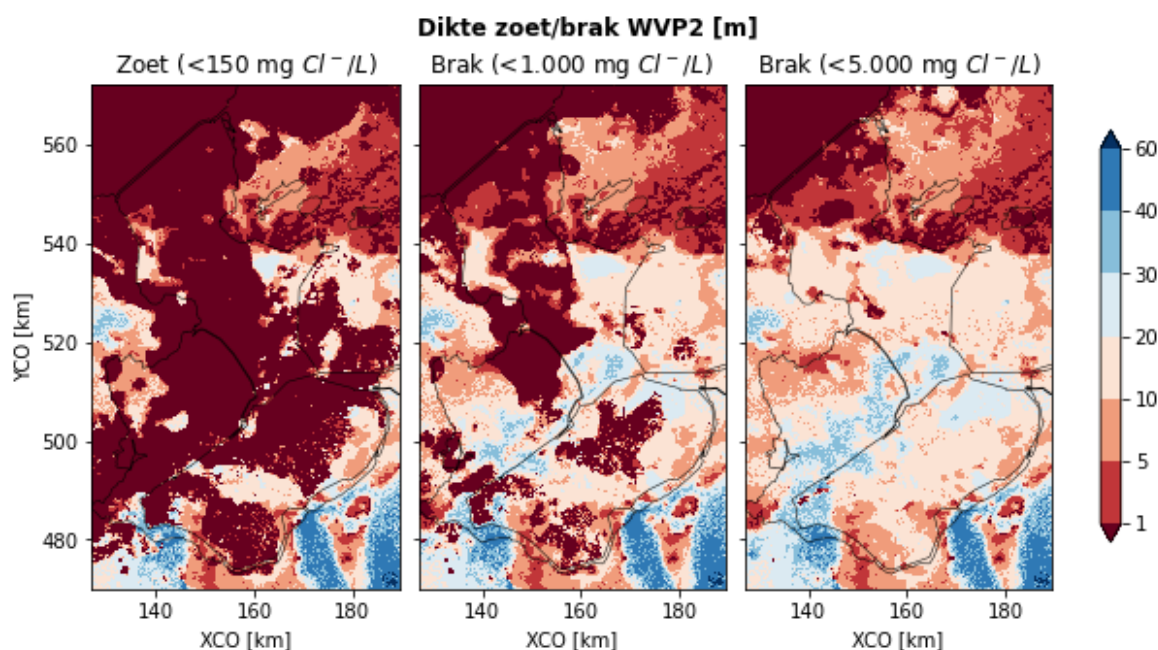
Voor de drie ondiepste LHM-modellagen onder de Holocene deklaag (modellaag 2, 3 en 4) is op basis van de gegevens uit het LHM zoet-zout model de dikte van het aanwezige zoet, licht brak en brak grondwater bepaald (Figuur 2.13, Figuur 2.14 en Figuur 2.15). Hierbij is gekeken naar de dikte van zoet water (<150 mg Cl/L) en licht brak (<1000 mg Cl/L) tot brak (<5000 mg Cl/L) water in modellaag 2, 3 en 4. Qua volume is er ongeveer 5600 miljoen m<sup>3</sup> zoet, 11000 miljoen m<sup>3</sup> licht brak en 31000 miljoen m<sup>3</sup> brak water beschikbaar in de bovenste drie modellagen, van totaal circa 66000 miljoen m<sup>3</sup>, in het IJsselmeer en Markermeer (tabel 2.1) en ongeveer 18000 miljoen m<sup>3</sup> zout grondwater (>5000 mg Cl/L). Deze drie modellagen dekken met name de ondiepe 100 meter in de profielen A-A', B-B' en C-C' (Figuur 2.5b, Figuur 2.8b en Figuur 2.9b).

Tabel 2.1. Beschikbare volume (miljoen m<sup>3</sup>) zoet (<150 mg Cl<sup>-</sup>/L), licht brak (<1000 mg Cl<sup>-</sup>/L) en brak (<5000 mg Cl<sup>-</sup>/L) grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer in LHM lagen 2, 3 en 4 en in totaal. Volume is de dikte van beschikbare hoeveelheid water vermenigvuldigd met de celgrootte van het LHM model (250x250 m) en een aangenomen porositeit van 0.3. De totale beschikbare hoeveelheid water binnen deze modellagen is ongeveer 66000 miljoen m<sup>3</sup>.

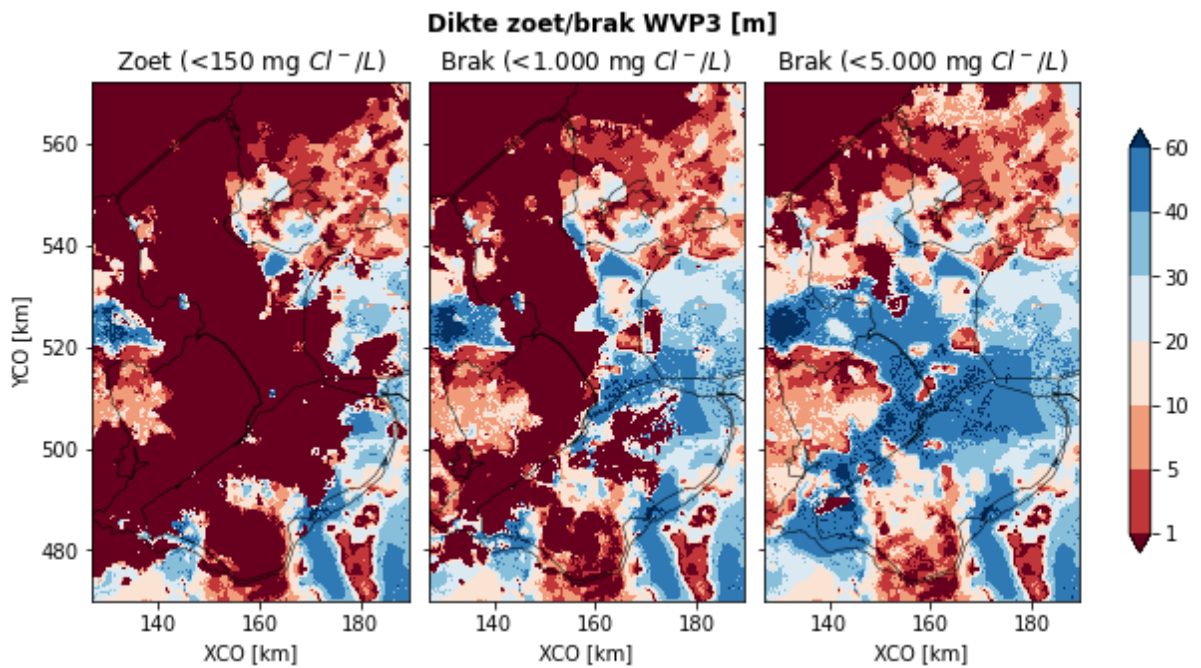
	Zoet (miljoen m <sup>3</sup> )		Licht brak (miljoen m <sup>3</sup> )		Brak (miljoen m <sup>3</sup> )	
	Markermeer	IJsselmeer	Markermeer	IJsselmeer	Markermeer	IJsselmeer
Laag 2	482	711	1653	1557	1422	1232
Laag 3	300	778	473	2279	4976	3619
Laag 4	1256	2074	2938	2071	10019	9864
Totaal	2037	3563	5064	5907	16417	14715

In de ruimtelijke verdeling van het zoet tot brakke grondwater vallen een aantal patronen op. Relatief weinig zoet water is beschikbaar in het totale IJsselmeergebied. Het aanwezige zoet water wordt met name in modellaag 4 aangetroffen, in het oosten van het IJsselmeer, tussen Urk en Stavoren, waar een klein gebied met een zoetwater dikte van 20 meter of meer ligt (Figuur 2.14). Licht brak en met name brak water zijn in veel grotere mate beschikbaar in de ondergrond van het IJsselmeergebied. Met name in de zones met de sterkste infiltratie (Figuur 2.11) komt relatief veel licht brak grondwater voor: in modellaag 2 komen diktes van 10 meter of meer voor langs de Flevo- en Noordoostpolders (Figuur 2.13). Op grotere diepte, met name in modellaag 3 (Figuur 2.14) komen nog grotere diktes voor van licht brak grondwater. Met name brak water is in het grootste deel van het IJsselmeergebied in grote hoeveelheden beschikbaar in alle watervoerende pakketten. Alleen het meest noordelijke deel van het IJsselmeergebied is hierbij een uitzondering: hier is vrijwel al het grondwater te zout voor grondwaterwinning. Brak water met chloride gehalte lager dan 5000 mg/L kan nog kostenefficiënt worden omgezet in zoet water (COASTAR, 2023) en wordt gezien als winbaar.

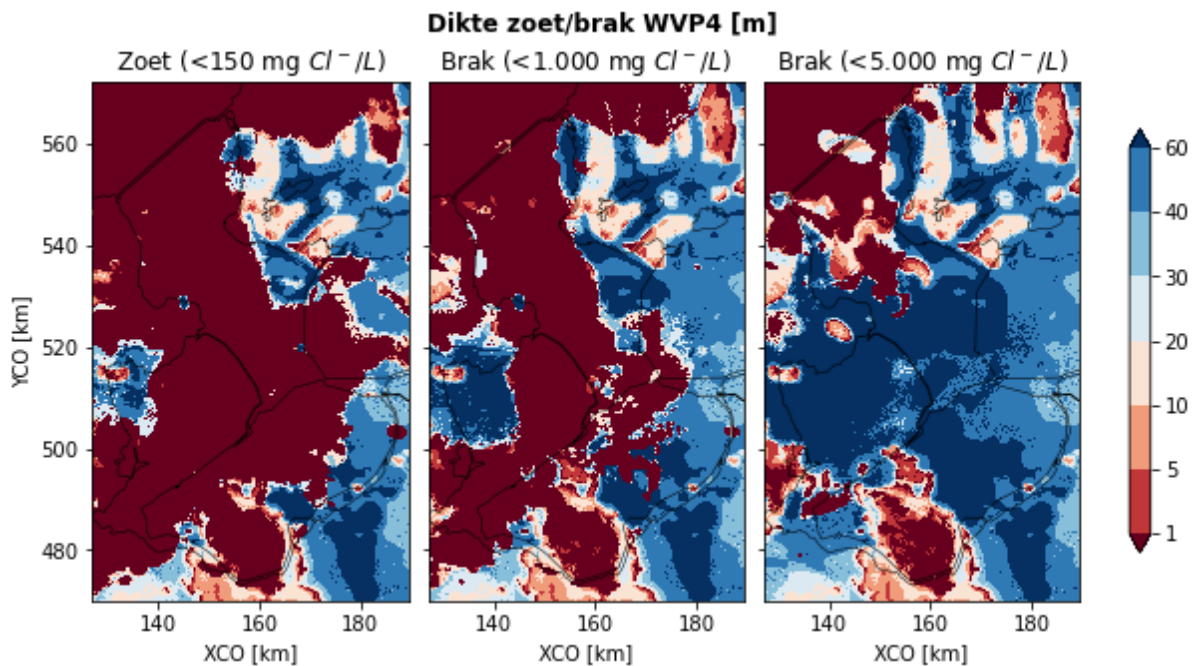
Op basis van het voorkomen van de boven genoemde types grondwater zijn een aantal modelscenario's (paragraaf 2.3.1) opgesteld welke onderdeel zijn van een modelverkenning (paragraaf 2.3) om te kijken wat de regionale effecten zijn van grondwateronttrekkingen in het IJsselmeergebied.



Figuur 2.13. Dikte van de beschikbare voorraad zoet, lichtbrak en brak water in modellaag 2.



Figuur 2.14. Dikte van de beschikbare voorraad zoet, lichtbrak en brak water in modellaag 3.

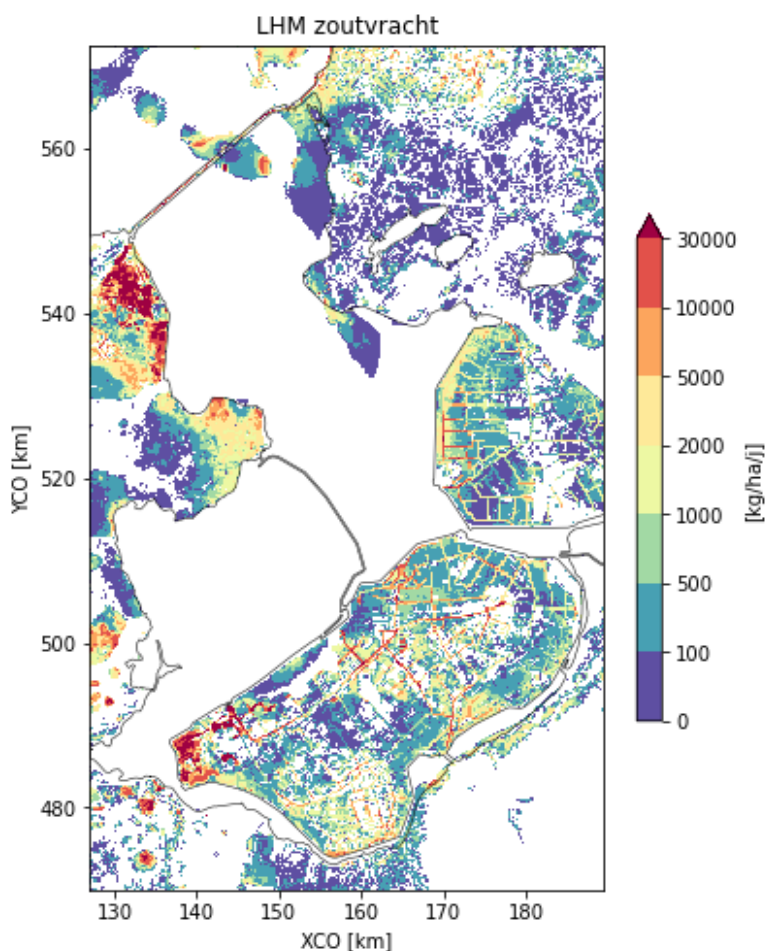


Figuur 2.15. Dikte van de beschikbare voorraad zoet, lichtbrak en brak water in modellaag 4.

## 2.2.8

### Zoutvrachten in de polders rondom het Markermeer en IJsselmeer

De combinatie van brak-zout grondwater en kwel leidt tot verhoogde zoutvrachten in de kwelpolders. Figuur 2.16 laat de berekende zoutvrachten zien voor deze kwelpolders rondom het IJsselmeer en Markermeer. Opvallend zijn de veel hogere zoutvrachten in de Wieringermeerpolder in vergelijking met de Flevopolders terwijl de kwelfluxen (Figuur 2.11) vergelijkbaar zijn. De zoutvracht in de Wieringermeerpolder is wel 30 keer zo hoog als in de Flevo- en Noordoostpolders. Dit heeft te maken met het ondiepere voorkomen van brak en zout grondwater met hogere zoutgehaltes in het noordelijke deel van het IJsselmeergebied ten opzichte van het zuiden.



Figuur 2.16. Berekende zoutvracht door kwel op basis van het LHM zoet-zout.

## 2.3 Methode

Er worden modelberekeningen uitgevoerd met het LHM zoet-zoutmodel met als doel om te verkennen wat de mogelijkheden zijn voor het onttrekken grondwater in het IJsselmeergebied als aanvullende voorraad voor de drinkwaterbereiding. Daarbij worden de effecten op de omgeving in het IJsselmeergebied (toename infiltratie IJsselmeerwater) en omliggende polders zoals de Flevopolder, Noordoostpolder en de Wieringermeer in beeld gebracht. De modelverkenning is uitgevoerd met de laatste versie van het landsdekkende zoet-zout grondwatermodel (LHM zoet-zoutmodel versie 4.1; America et al., 2021; Delsman et al., 2023).

Het LHM zoet-zoutmodel berekent op nationale schaal de verplaatsing van grondwater en daarin opgelost zout in het Nederlandse grondwatersysteem op een tijdschaal van decennia tot eeuwen. Het model wordt gebruikt voor landsdekkende verziltingsstudies (bijv. effecten van zeespiegelstijging) ter ondersteuning van lange-termijn beleidsvorming op landelijk niveau. Het model is gericht op de simulatie van gemiddelde situaties doordat een gemiddelde grondwateraanvulling gebruikt wordt als modelinvoer. Met het instrumentarium kunnen bijvoorbeeld grondwaterstanden, stijghoogten in diepere watervoerende pakketten, kwel- en wegzijgingsfluxen en de verandering in zoet-zout grondwater verdeling in kaart worden gebracht.

### 2.3.1 Overzicht modelvarianten

Om te kwantificeren wat de mogelijkheden van het gebruik van grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer zijn met de daarbij behorende effecten op omliggende polders, zijn een viertal scenario's doorgerekend (Tabel 2.2). In Figuur 2.17 zijn de locaties van de winningen voor de verschillende scenario's weergegeven.

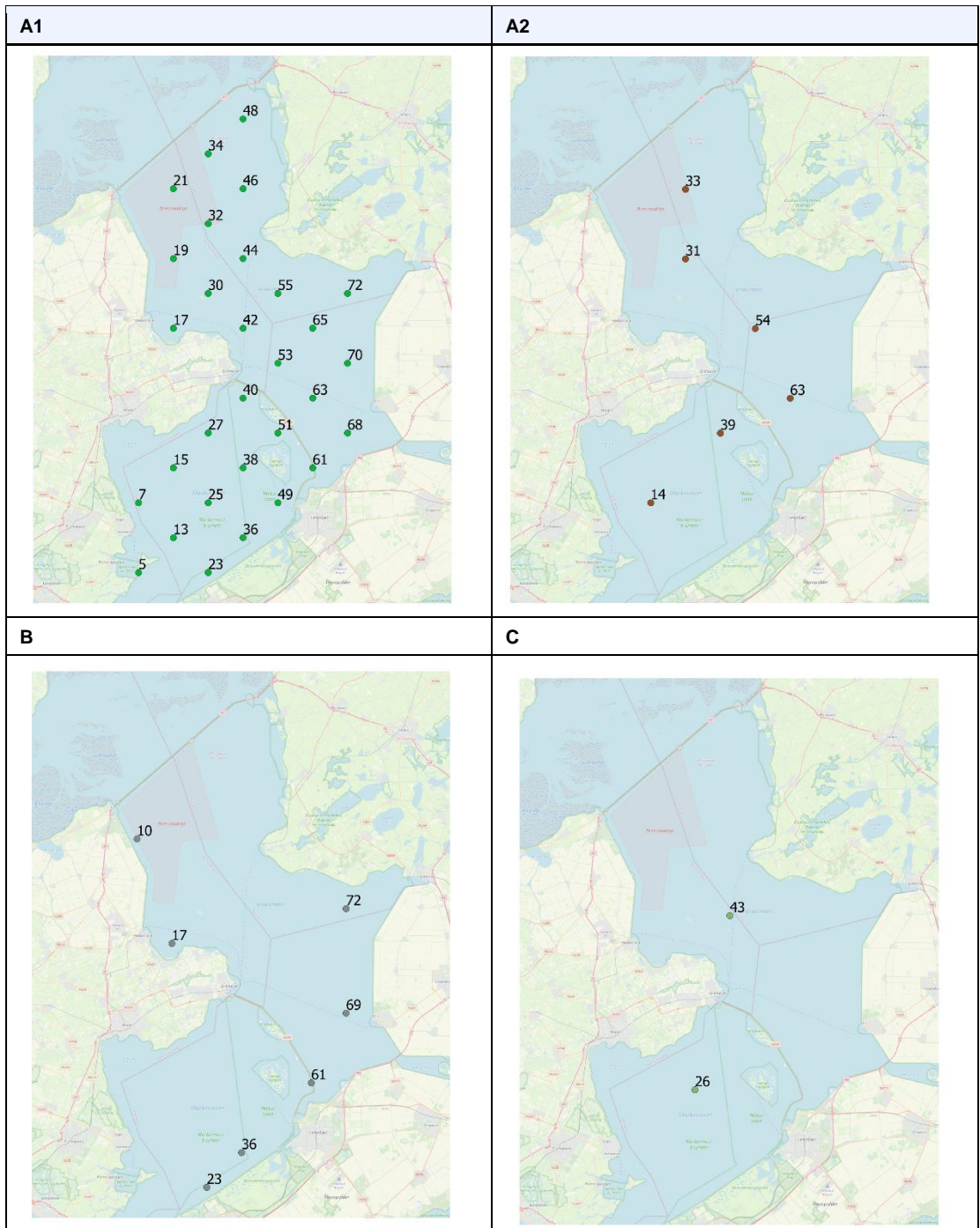
Het IJsselmeergebied betreft een groot gebied waar in potentie veel grondwater kan worden gewonnen en daarom worden er ook grote debieten doorgerekend van in totaal 120 en 140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar.

- In scenario's A1 en A2 zijn winningen van in totaal 120 miljoen m<sup>3</sup>/jaar ruimtelijk verspreid over het IJsselmeer waar bij 30 middelgrote onttrekkingen van ieder 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (scenario A1) en 6 zeer grote onttrekkingen van ieder 20 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (scenario A2) worden gesimuleerd. De 6 zeer grote winningen zijn geplaatst in het midden van het IJsselmeer en Markermeer om zo weinig mogelijk effect te hebben op de aangrenzende polders.  
Er is gekozen voor grote winningen zodat het aantal winningslocaties en pijpleidingen in het IJsselmeer beperkt kan worden want installatie in open water betreft een grote uitdaging.
- In scenario B zijn de winningen geplaatst met als neven doel de kwel flux in de diepe polders te reduceren en zijn daarom aan de rand van het IJsselmeergebied geplaatst. Immers, de onttrekkingen verlagen de stijghoogte en als de effecten uitstralen naar de diepe polders zal dit leiden tot minder kwel. Dit kan als positief worden beschouwd omdat er dan minder water hoeft te worden uitgemalen, de zoutbelasting afneemt en er minder extra infiltratie vanuit de meren optreedt.
- In scenario C zijn één winning in het midden van het Markermeer en één winning in het midden van het IJsselmeer geplaatst met ieder een onttrekkingsdebiet van 20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Dit om te verkennen of de effecten van 2 grote winningen beperkt kunnen blijven tot het IJsselmeer en Markermeer zelf.

Tabel 2.2 Overzicht modelvarianten

ID	Naam	Aantal onttrekkingen	Debiet [Mm3/jaar]	Totale debiet [Mm3/jaar]	Watervoerend pakket
REF	Huidige situatie	0	0	0	n.v.t.
A1	Vlakdekkend klein	30	4	120	1
A2	Vlakdekkend groot	6	20	120	1
B	Kwelzone	7	20	140	1
C	Centraal	2	20	40	1





Figuur 2.17 Locaties van winningen in de verschillende scenario's.

### 2.3.2 Modelinvoer

De analyse is uitgevoerd voor de periode 2020-2070. Veranderingen ten aanzien van zeespiegelstijging en meteorologische veranderingen door klimaatverandering zijn niet meegenomen. De scenario's zijn doorgerekend met een grondwateraanvulling dat representatief is voor het huidige klimaat. Een periode van 50 jaar is doorgerekend om de ontwikkelingen in de zoutzout-verdeling en het zoutgehalte van het onttrekkingswater in beeld te brengen.

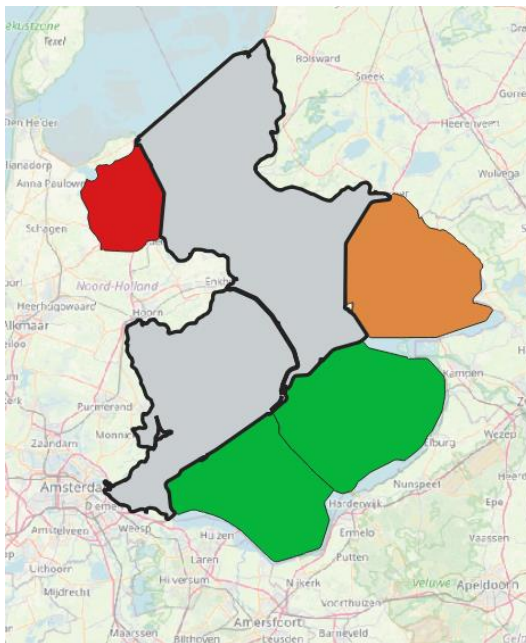
De winningen zijn geplaatst in het eerste watervoerende pakket dat aan de volgende criteria kon voldoen:

- de minimale weerstand van bovenliggende weerstandslaag > 200 dagen,
- de minimale transmissiviteit (kD-waarde) van het watervoerende pakket > 100 m<sup>2</sup>/d,
- de top van het filter niet dieper dan 60 meter onder maaiveld.

Daarnaast is er aangenomen dat het filter niet langer is dan 10 meter. Wanneer het watervoerende pakket dunner is dan 10 meter, is het filter hierop aangepast. In Bijlage 6B is meer informatie te vinden over de schematisatie van de winningen. Het kan voorkomen dat een onttrekking in meerdere modellagen voorkomt. Wanneer dit plaatsvindt wordt het debiet gelijkmatig verdeeld over de modellagen, corresponderend met de dikte van de laag.

### 2.3.3 Gebiedsindeling voor aggregatie van resultaten

De analyse is uitgevoerd met de focus op de effecten op het IJsselmeer en Markermeer en omliggende polders. In het volgende hoofdstuk worden de resultaten daarom ook geaggregeerd over het gehele IJsselmeer en Markermeer, de Wieringermeer, de Noordoostpolder en de Flevopolder (Figuur 2.18).



*Figuur 2.18 Schematisatie van het IJsselmeer gebied (licht grijs) en de omliggende polders: Wieringermeer (rood), Noordoostpolder (oranje) en de Flevopolder (groen).*

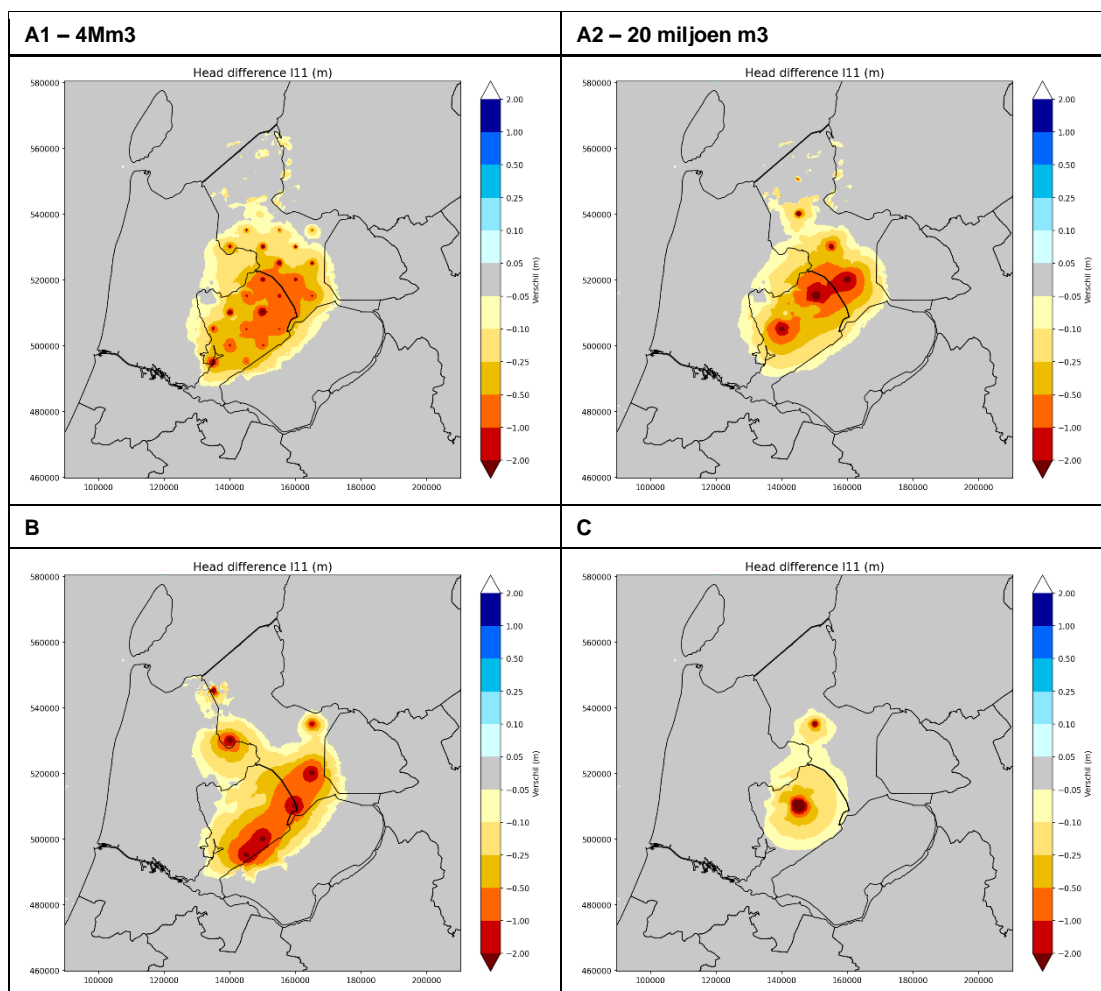
## 2.4 Resultaten

### 2.4.1 Grondwaterstanden en stijghoogtes

Het plaatsen van grondwateronttrekkingen in het IJsselmeergebied leidt tot een daling van de stijghoogtes in diepere watervoerende pakketten en ondiepere grondwaterstanden (Figuur 2.19). De effecten zijn het grootst in de pakketten waaruit onttrokken wordt en deze effecten vertalen zich door naar onder- en bovenliggende pakketten.

De onttrekkingen met een debiet van 4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar zorgen lokaal voor een minder grote daling van de stijghoogte dan de onttrekkingen met een debiet van 20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar maar het uitstralingsgebied is wel iets groter (vergelijking van varianten A1 en A2). Over een groter gebied daalt de stijghoogte met 0.1 tot 1.0 meter en voor variant A2 lokaal tussen 1 en 2 m. De invloedzones van de verschillende winningen met in totaal 120 miljoen m<sup>3</sup>/jaar raken elkaar waardoor er voor een groot aaneengesloten gebied de stijghoogte daalt.

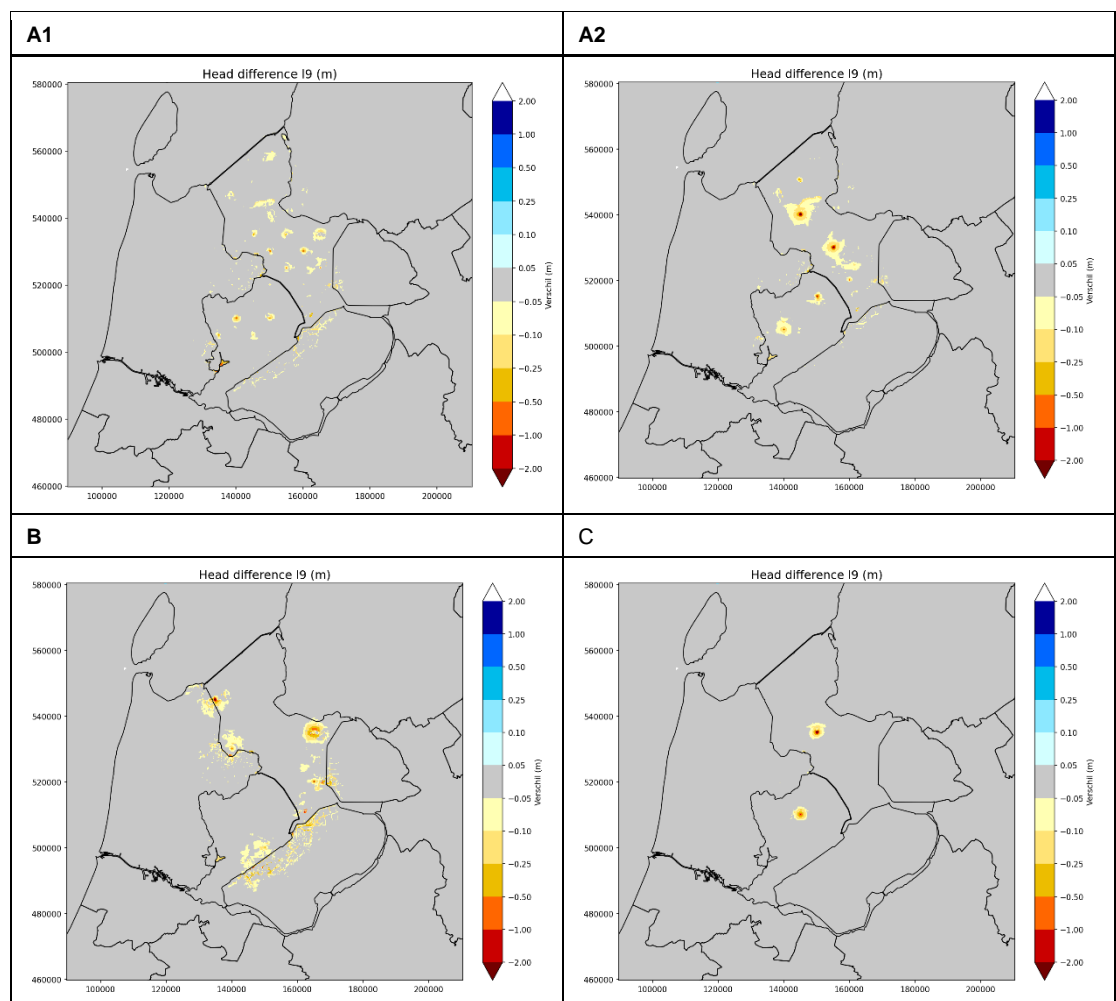
De effecten van grondwateronttrekkingen aan de rand van diepe polders (variant C) laten vergelijkbare dalingen zien maar uiteraard meer geconcentreerd in het gebied met onttrekkingen en daarmee met iets meer uitstraling richting de diepe polders. De effecten op de stijghoogte van variant C met 2 putten van 20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in het midden van het IJsselmeergebied laten uiteraard een veel mindere grote uitstraling zien omdat er minder onttrokken wordt. De uitstralingseffecten groter dan 0.10 m blijven voor deze variant van in totaal 40 miljoen m<sup>3</sup>/jaar helemaal beperkt tot het IJsselmeergebied.



Figuur 2.19 Effect van grondwaterwinningen op de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket (m), na 50 jaar grondwater onttrekken.

De effecten op de stijghoogte zijn niet helemaal uniform over het gebied verdeeld, in het noordelijke gedeelte van het IJsselmeer worden kleinere effecten berekend. Hier zijn de winningen iets dieper geplaatst omdat het eerste watervoerende pakket niet kon voldoen aan de randvoorwaarden die eerder zijn opgesteld (zie paragraaf 2.3.2). Dit heeft met name te maken met het relatief ondiepe voorkomen van dikke slecht doorlatende glaciale afzettingen in het noorden van het IJsselmeer (Fm. van Drenthe; Figuur 2.8).

De effecten op de ondiepe grondwaterstanden in de deklaag (modellaag 1) zijn duidelijk veel kleiner dan de effecten op de stijghoogte. Een groter lokaal debiet, vergelijk variant A2 (20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) met variant (4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) leidt tot grotere dalingen rondom de winningen. De effecten op de ondiepe grondwaterstanden zijn klein omdat er een onuitputbare voedingsbron (voor de modelperiode) met een constant peil aanwezig is (het IJsselmeer en Markermeer). Het is duidelijk dat een lagere ondiepe grondwaterstand in de deklaag leidt tot meer infiltratie vanuit het IJsselmeer. Dit wordt in de volgende paragraaf besproken.



Figuur 2.20 Effect van grondwaterwinningen op de ondiepe grondwaterstanden (m), na 50 jaar grondwater onttrekken.

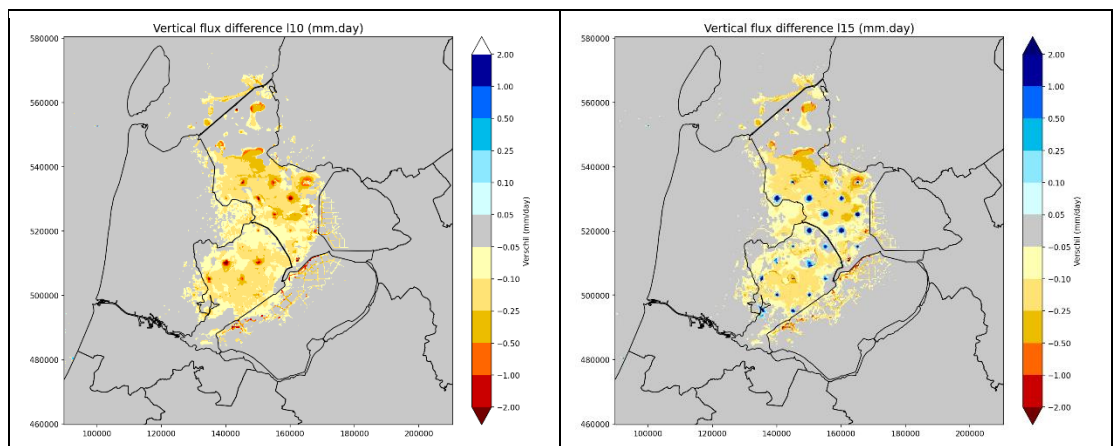
## 2.4.2 Kwel en infiltratieflux

Veranderingen in ondiepe grondwaterstanden en stijghoogtes gaan hand in hand met veranderingen in verticale grondwaterfluxen, kwel en infiltratiefluxen. Het IJsselmeergebied kan gezien worden als een infiltratiegebied waarbij de omliggende, vaak dieper gelegen, polders gezien kunnen worden als kwelgebieden.

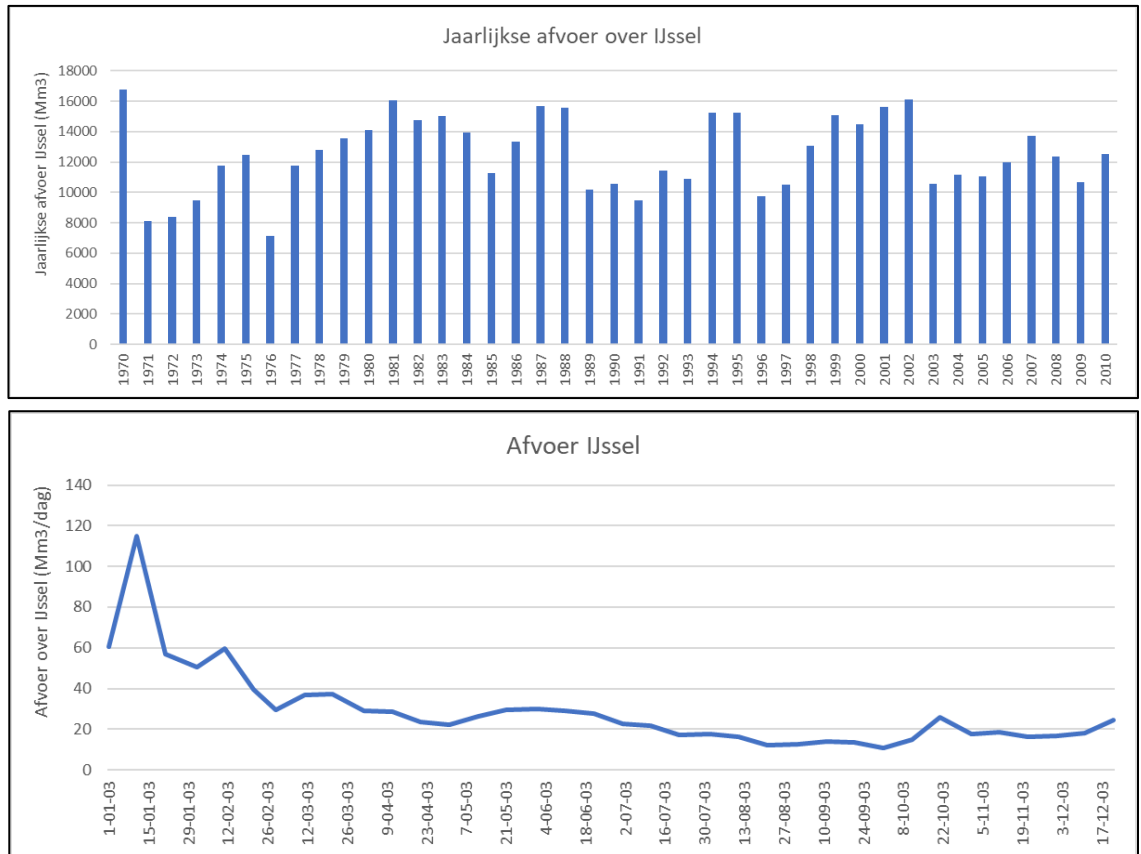
De daling van de stijghoogte van het eerste watervoerende pakket (en daarmee de ondiepe grondwaterstand in de deklaag) zorgt voor een toename van de infiltratieflux in het IJsselmeer (Figuur 2.21). De in deze studie doorgerekende modelvarianten tonen dat bij een maximaal onttrekkingsdebiet van 120 miljoen m<sup>3</sup>/jaar er maximaal 100 miljoen m<sup>3</sup>/jaar extra infiltreert vanuit het IJsselmeer (variant A2; Tabel 2.3). De overige 20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar wordt aangevuld vanuit dieper watervoerende pakketten (Figuur 2.21) en vertaald zich door tot minder kwel of meer infiltratie in de omliggende polders.

Het toenemende infiltratiedebiet van 100 miljoen m<sup>3</sup>/jaar is minder dan 1% van de jaarlijkse wateraanvoer vanuit de IJssel, dat gemiddeld 12500 miljoen m<sup>3</sup>/jaar is (Figuur 2.22). In droge zomers zou het onttrekkingsdebiet misschien beperkt moeten worden wanneer de wateraanvoer debieten te laag worden. In het droge jaar 2003 was de dagelijkse wateraanvoer ongeveer 15 miljoen m<sup>3</sup>/dag. Het onttrekkingsdebiet (0.27 miljoen m<sup>3</sup>/dag) is dan slechts 1.8% van de dagelijkse wateraanvoer vanuit de IJssel. Het onttrekken van grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer met in totaal 120 miljoen m<sup>3</sup>/jaar heeft dus nauwelijks effect op de waterbalans van het IJsselmeergebied.

De daling van de stijghoogte van het eerste watervoerende pakket zorgt voor een daling van de kwelflux in de omliggende polders (Tabel 2.3). In scenario B is de reductie van de kwelflux in omliggende polders het grootst.



Figuur 2.21 Effect van grondwaterwinningen op de verticale flux (mm/dag) vanuit het eerste watervoerende pakket naar de deklaag (flux over modellaag 10) (links) en flux over de tweede weerstand biedende laag (modellaag 15) (rechts) (uitwisselingsflux tussen het eerste watervoerende pakket en het freatisch systeem), na 50 jaar grondwater onttrekken in modelvariant A1. Gele kleuren tonen een toename in neerwaartse flux (infiltratie) of afname in opwaartse flux (kwel) en blauwe kleuren tonen een toename in opwaartse flux (kwel). Zie bijlage C voor varianten A2, B en C.



Figuur 2.22 Jaarlijkse afvoer over de IJssel (miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en dagelijkse afvoer (miljoen m<sup>3</sup>/dag) over de IJssel in 2003.

Tabel 2.3 Totale kwel (positief) of infiltratieflux (negatief) (miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en de procentuele verandering in de verschillende varianten ten opzichte van de referentie situatie (grijze vlakken) voor het IJsselmeer, Wieringermeer, Noordoostpolder en de Flevopolder (Figuur 2.18).

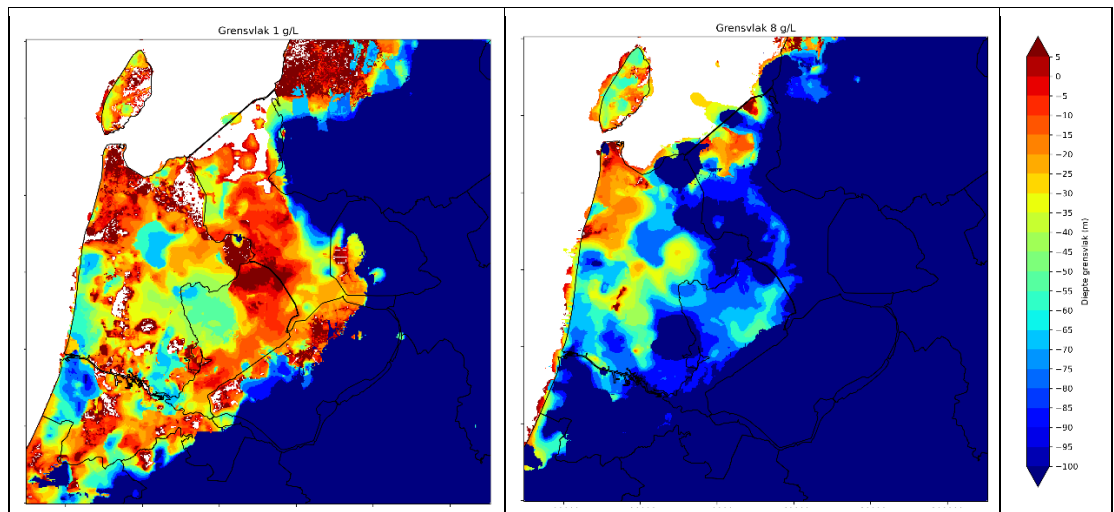
	IJsselmeer		Wieringermeer		Noordoostpolder		Flevopolder	
<b>Referentie</b>	-236.5		77.6		122.4		241.6	
<b>A1</b>	-320.4	35.5%	76.3	-1.7%	120.2	-1.8%	229.3	-5.1%
<b>A2</b>	-335.1	41.7%	76.4	-1.6%	120.6	-1.5%	236.3	-2.2%
<b>B</b>	-324.9	37.4%	70.5	-9.2%	117.6	-4.0%	213.5	-11.6%
<b>C</b>	-272.6	15.3%	77.5	-0.1%	122.4	-0.1%	240.3	-0.5%

### 2.4.3 Zoet-zout verdeling

De veranderingen in verticale fluxen zorgen ervoor dat de zoet-zout verdeling van het grondwater ook verandert. In de huidige situatie ligt het zoet-zout grensvlak van 1 g/L op veel plekken op minder dan 10 meter onder de IJsselmeer bodem (Figuur 2.23). Het grensvlak van 8 g/L ligt daarentegen een stuk dieper met uitzondering van het noordelijke gedeelte van het IJsselmeer.

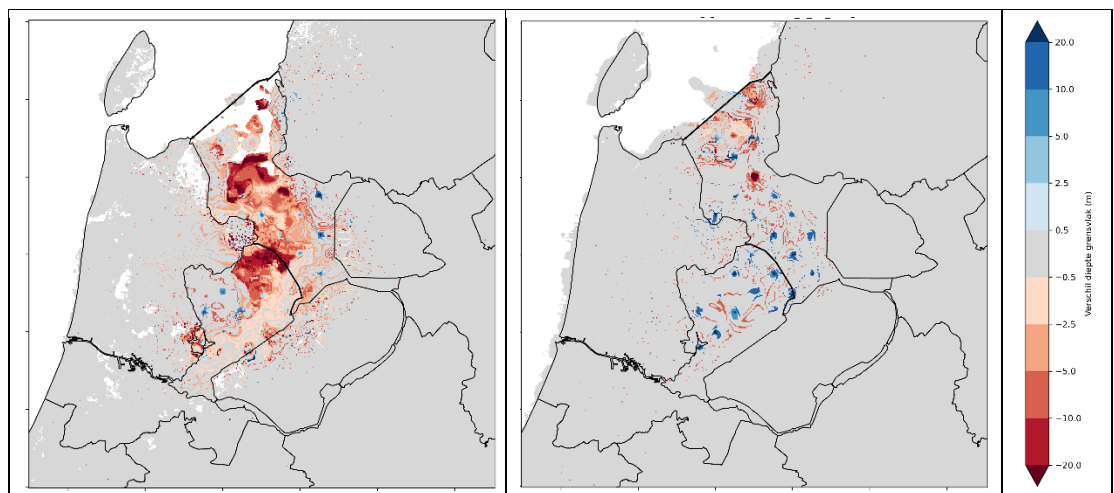
De effecten van de grondwateronttrekkingen op de zoet-zoutverdeling zijn ruimtelijk heel verschillend. In het algemeen kan gezegd worden dat de grondwateronttrekkingen ervoor zorgen dat het zoet-zout grensvlak van 1 g/L in veel gebieden een aantal meter zakt. Hier treedt dus verzoeting van het ondiepe grondwatersysteem op. Het grensvlak van 8 g/L stijgt in de meeste onttrekkingslocaties doordat (zout) grondwater in dieper watervoerende pakketten wordt aangetrokken (Figuur 2.21). Dit effect, ook wel opkegeling genoemd, blijft redelijk beperkt

tot de directe omgeving van de onttrekking (Figuur 2.24). Doordat de zoet-zoutgrens van 1 g/L dieper komt te liggen neemt het zoetwatervolume onder het IJsselmeer en Makermeer iets toe (Tabel 2.4).



Figuur 2.23 Diepte (m-mv) van het zoet-zout grensvlak van 1 g/L (links) en 8 g/L (rechts) in huidige situatie.

In Tabel 2.4 is te zien dat als gevolg van de onttrekkingen het volume zoet water toeneemt en dat het beschikbare brak water het sterkst afneemt. In modellaag 2 neemt in alle scenario's de hoeveelheid licht brak water ook sterk af maar wanneer de diepere modellagen in beschouwing worden genomen neemt deze, met uitzondering van scenario C, relatief sterk toe. Scenario's A1 en A2 laten vergelijkbare toenames van zoet water (~365 miljoen m<sup>3</sup>) en vergelijkbare afnames van licht brak en brak water zien. De hoeveelheid zout water in modellaag 2 neemt relatief ook sterk af, echter is dit qua absoluut volume laag vanwege de lage hoeveelheid zout water. In de scenario's A1 en A2 treden de sterkste toenames van zoet water op en in scenario's B en C neemt het zoet water minder toe: respectievelijk 255 en 138 miljoen m<sup>3</sup>. De grootste invloed van de onttrekkingen vindt vanzelfsprekend plaats in het eerste watervoerende pakket (N.B. dit is waar grondwater wordt onttrokken) maar te zien is dat de onttrekkingen ook een verzoeting in de dieper gelegen watervoerende pakketten tot gevolg heeft.



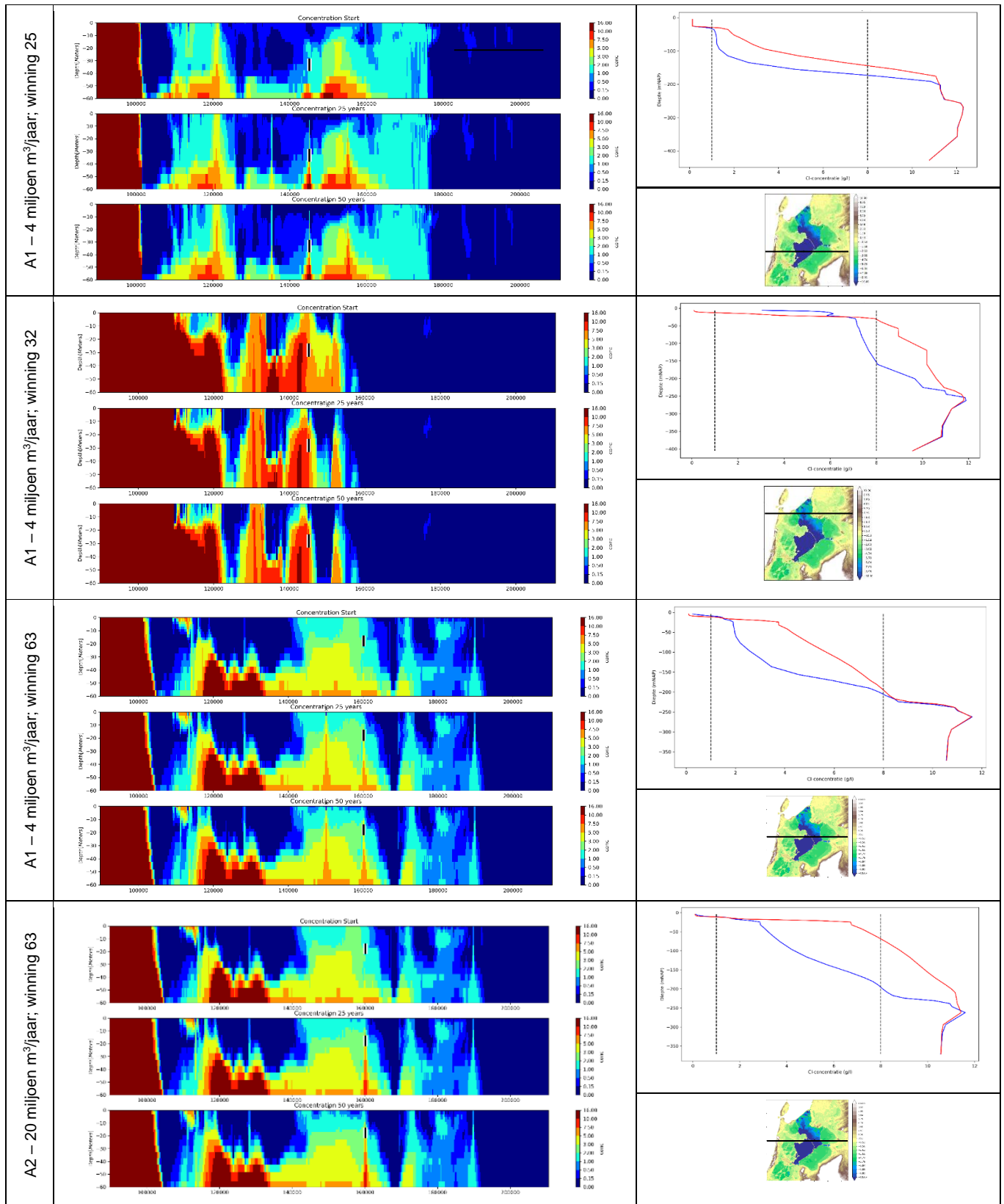
Figuur 2.24 Verandering in het zoet-zout grensvlak van 1 g/L (links) en 8 g/L (rechts) ten opzichte van huidige situatie, na 50 jaar grondwater onttrekken in modelvariant A1. Blauwe kleuren tonen een stijging van het zoet-zout grensvlak en rode kleuren een daling. Zie bijlage C voor varianten A2, B en C.

Tabel 2.4. Verandering van het volume (miljoen m<sup>3</sup>) zoet (<150 mg Cl<sup>-</sup>/l), licht brak (<1000 mg Cl<sup>-</sup>/l) en brak (<5000 mg Cl<sup>-</sup>/l) water in het IJsselmeergebied in modellaag 2 en modellaag 2, 3 en 4 samen op basis van de gemodelleerde scenario's. De volume verandering en ratio zijn ten opzichte van het referentie scenario met enkel autonome veranderingen. Scenario 'REF' laat de autonome veranderingen (zonder onttrekkingen) zien van het model ten opzichte van de huidig beschikbare voorraden (zie tabel 2.1).

Scenario	Laag	Zoet (miljoen m3)		Licht brak (miljoen m3)		Brak (miljoen m3)		Zout (miljoen m3)	
		volume	ratio	volume	ratio	volume	ratio	volume	ratio
REF	2	560	2.41	-46	0.96	-434	0.51	-80	0.26
	2,3,4	973	1.52	525	1.14	-959	0.91	-539	0.77
A1	2	347	1.36	-174	0.83	-161	0.64	-12	0.58
	2,3,4	553	1.19	120	1.03	-520	0.94	-153	0.92
A2	2	365	1.38	-171	0.83	-183	0.59	-11	0.6
	2,3,4	668	1.24	98	1.02	-565	0.94	-202	0.89
B	2	255	1.27	-169	0.84	-84	0.81	-3	0.91
	2,3,4	517	1.18	62	1.01	-534	0.94	-45	0.97
C	2	138	1.14	-66	0.94	-70	0.85	-2	0.93
	2,3,4	196	1.07	1	1	-63	0.99	-134	0.93

In Figuur 2.25 wordt ingezoomd op 4 verschillende doorsnedes met daarin de zoutverdeling met de diepte. Ter hoogte van winning 25 (in het midden van Markermeer) lijkt op het eerste gezicht geen grote veranderingen ten aanzien van de zoet-zoutverdeling plaats te vinden. Echter, aan de bovenrand van het Markermeer (tussen x= 13000 en x = 16000) wordt het water een stuk zoeter in de eerste 10 meter (donker blauw). Dicht in de buurt van winning 32 (in het noorden van IJsselmeer) neemt de zoutconcentratie toe in 50 jaar tijd doordat het omliggend zout grondwater aantrekt. Hierdoor ontstaat er een neerwaartse infiltratie flux met zoetwater vanuit het IJsselmeer waardoor het rondom de winning zoeter wordt. Voor winning 63 (in het midden van IJsselmeer en Markermeer) zijn de doorsnedes afgebeeld met het lage en het hoge onttrekkingsdebiet. In winning 63 is opkegeling goed zichtbaar en de effecten zijn groter bij een groter onttrekkingsdebiet (zie ook bijlage C).

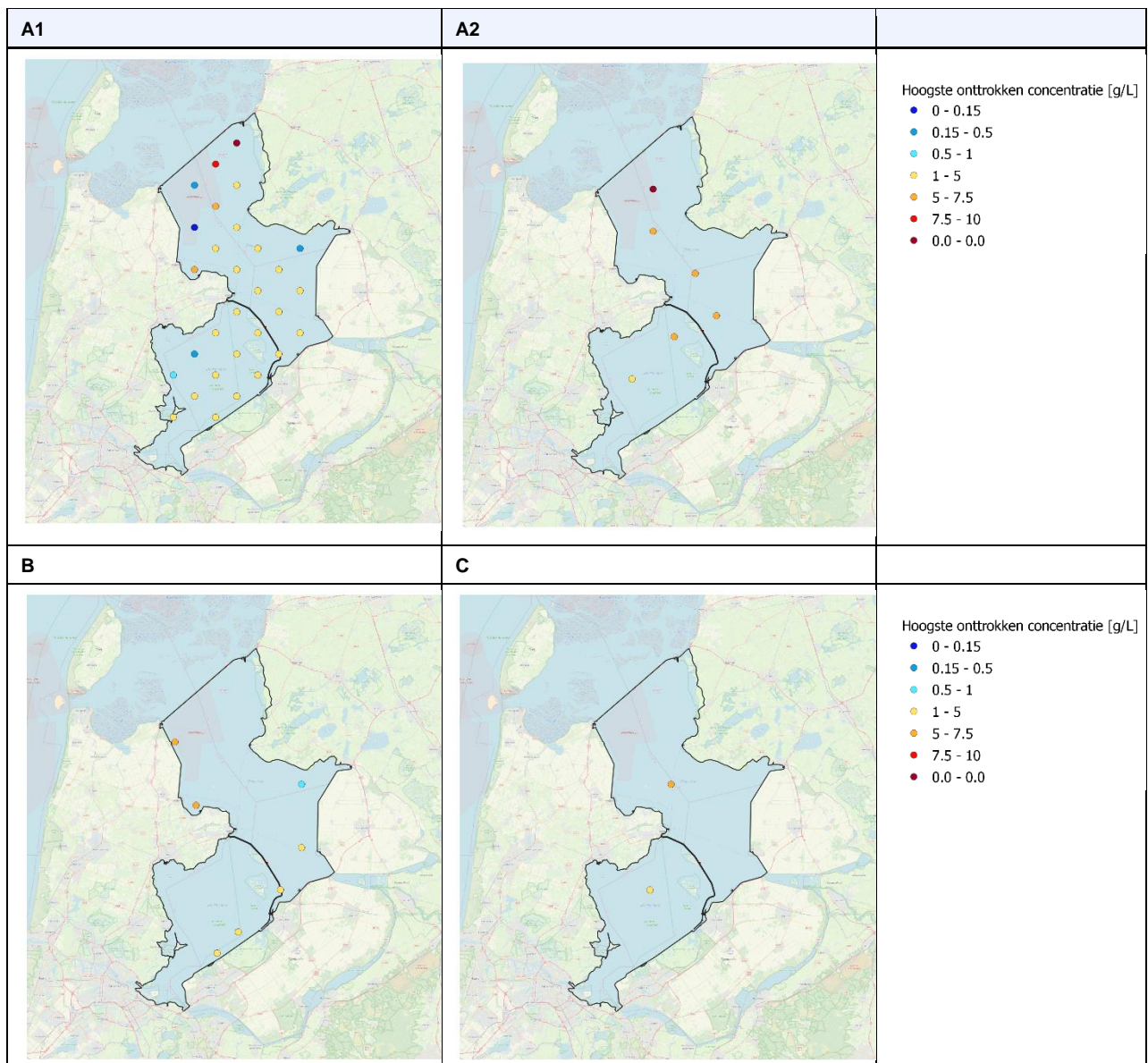




Figuur 2.25 Links: Chloride-concentratie verdeling [g/L] voor 3 momenten in de tijd (huidig, na 25 jaar en na 50 jaar). Rechts: de chloride-concentratie [g/L] verdeling over de diepte in 2020 (blauwe lijn) en na 50 jaar onttrekken (rode lijn), voor 4 onttrekkingswinnings (A1-winning 25, A1-winning 32, A1-winning 63 en A2-winning 63). De zwarte lijn in het overzichtsfiguur toont de locatie van de doorsnede.

### 2.4.4 Onttrekkingswater

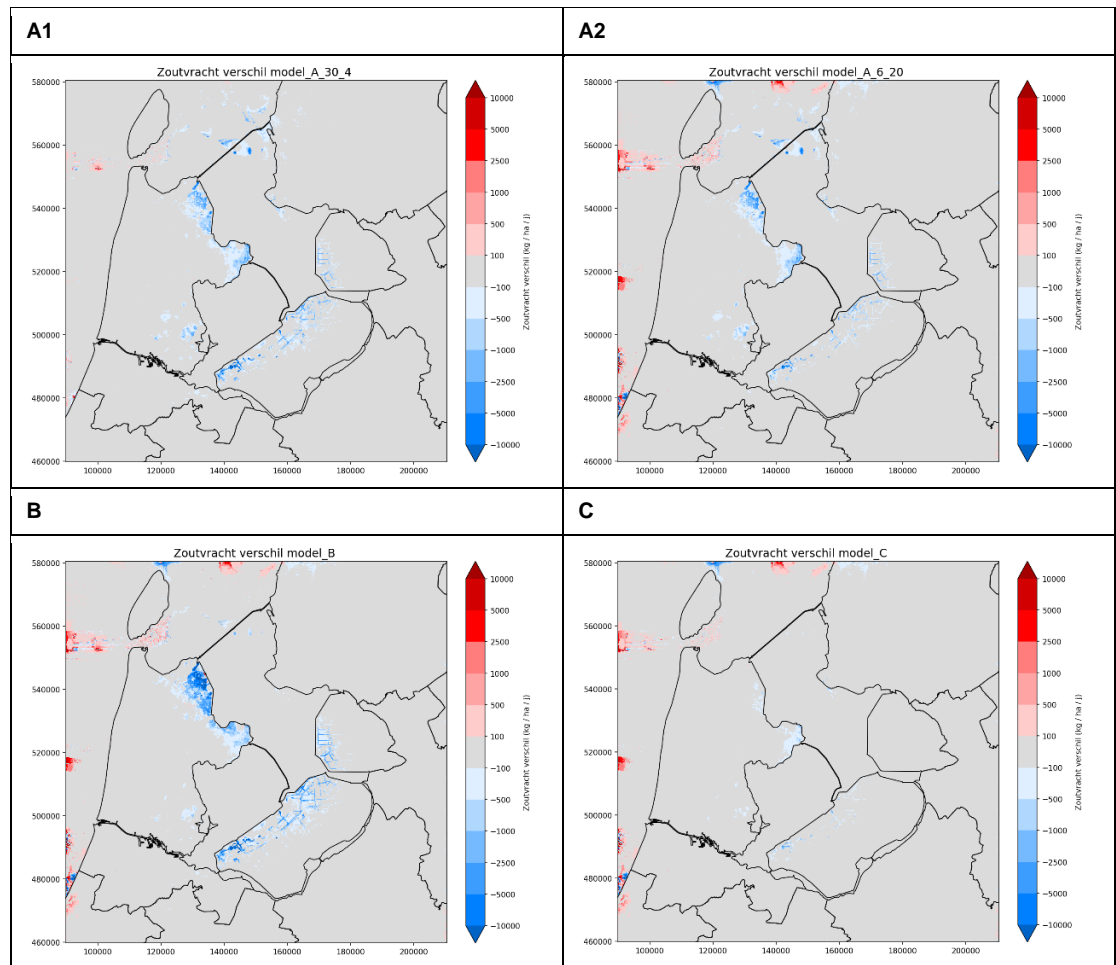
In Figuur 2.24 werd al zichtbaar dat het zoet-zout grensvlak omhoog komt op alle onttrekkingslocaties doordat (zout) grondwater in dieper watervoerende pakketten wordt aangetrokken. Op deze locaties neemt de chloride concentratie nabij het filter toe. Dit betekent dat water dat onttrokken wordt vaak niet zoet is, maar brak tot zout. In Figuur 2.26 worden de hoogste onttrokken chloride concentraties [g/L] getoond voor de verschillende varianten. Na 50 jaar is rondom de meeste onttrekkingsputten een evenwicht bereikt (zie Figuur 6.6 in bijlage C). Bij een onttrekkingsdebiet van 4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (variant A1) blijven de meeste onttrekkingen onder de 5 g/L. We zien dit als de bovengrens om brakwater te winnen. Hierboven is het niet rendabel om water te ontzilten. Alleen in het noorden wordt water onttrokken met concentraties hoger dan 5 g/L. Bij een onttrekkingsdebiet van 20 miljoen m<sup>3</sup>/jaar wordt het onttrokken water zouter (tussen de 5 en 7.5 g/L). Het is bekend dat er sterkere zoutwater opkegeling optreedt bij grotere onttrekkingsdebieten. Bij de onttrekkingen nabij de kwelzone van de Flevopolder en Noordoostpolder blijft de chloride concentratie van het onttrokken water concentratie onder de 5 g/L.



Figuur 2.26 Maximale concentratie van onttrokken water [g/L]

## 2.4.5 Zoutbelasting

De toenemende infiltratieflex in het IJsselmeer en de afnemende kwelflux in omliggende polders (Tabel 2.3), met de daarbij behorende concentratie veranderingen in het grondwater (Tabel 2.4), zorgen voor een afname in zoutvracht naar het oppervlaktewater (Figuur 2.27). De afname in zoutvracht is het grootst in variant B, waar de winningen zo zijn geplaatst dat het de kwelflux in de omringende polders zou reduceren (Tabel 2.5). Door de afname in zoutvracht naar het oppervlaktewater is er minder zoetwater nodig om sloten door te spelen.



Figuur 2.27 Effect van grondwaterwinningen op de zoutvracht (kg/ha/jaar), na 50 jaar grondwater onttrekken. Blauw is een afname van de zoutvracht (de weergegeven effecten in de Noordzee kunnen als modelartefacten worden gezien).

Tabel 2.5 Totale jaarlijkse zoutvracht in de referentiesituatie (kg/ha) en de procentuele verandering in de verschillende varianten ten opzichte van de referentie situatie voor de Wieringermeerpolder, Noordoostpolder en de Flevopolder (Figuur 2.18).

	Eenheid	Wieringermeerpolder	Noordoostpolder	Flevopolder
<b>Referentie</b>	kg/ha	2.8E+08	4.3E+07	2.0E+08
<b>A1</b>	%	-2.6%	-4.5%	-8.7%
<b>A2</b>	%	-2.8%	-3.9%	-3.4%
<b>B</b>	%	-14.0%	-9.6%	-19.2%
<b>C</b>	%	-0.2%	-0.1%	-0.8%

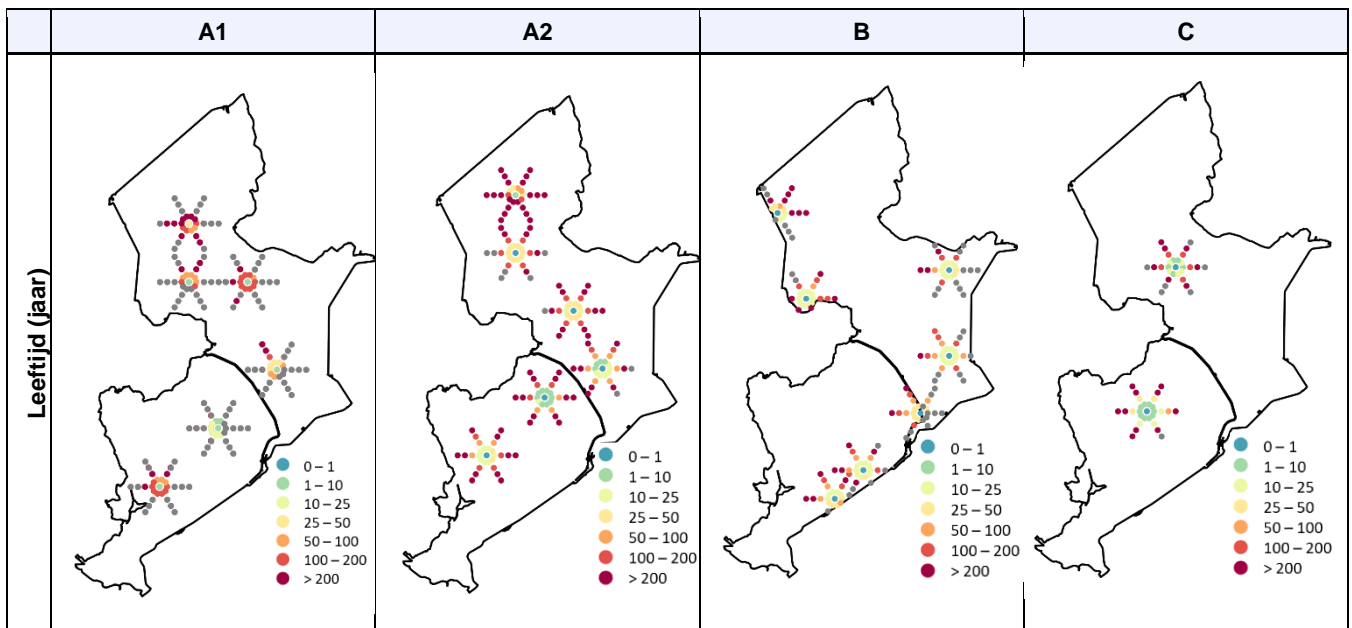
## 2.4.6 Reistijden

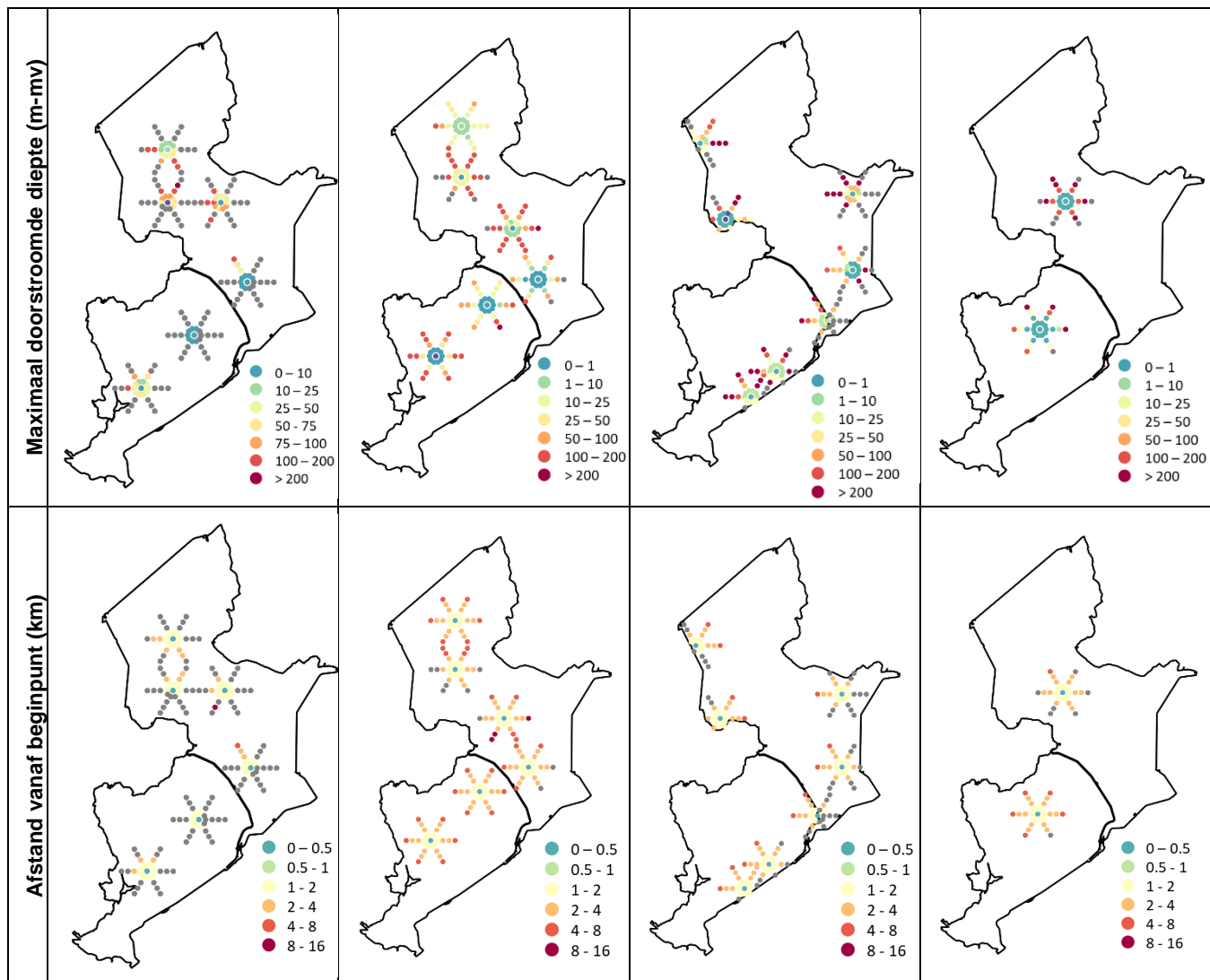
Om erachter te komen hoelang het duurt voordat IJsselmeerwater in een onttrekkingsput terecht komt zijn met de imodpath-functie in iMOD voorwaartse stroombanen gevisualiseerd. Voor de stroombaananalyse zijn water deeltjes in het IJsselmeer gestart in cirkels en in 6 raaien rondom de onttrekkingsput, met een afstand van 0km, 1.25km, 2.5km, 3.75km en 5km vanaf de onttrekkingsput. Deze analyse is van belang om te kunnen beoordelen of het onttrokken water lang genoeg onderweg is en welke pakketten het doorstroomt om gebruik te kunnen maken van het zuiverend vermogen van de ondergrond.

Bij een onttrekkingsdebiet van 20 miljoen m<sup>3</sup> wordt, in het algemeen, IJsselmeer water binnen een straal van 1.25 km binnen 50 jaar onttrokken (Figuur 2.28). Op de locatie van de onttrekkingsput komt het IJsselmeerwater meestal binnen 1 jaar in de put terecht. Voor een straal van 1.25 km rondom de put, is de gemiddelde reistijd voor de meeste locaties tussen de 10 en 25 jaar en in enkele gevallen tussen de 1 en 10 jaar.

Bij een lager onttrekkingsdebiet van 4 miljoen m<sup>3</sup> zijn de reistijden naar de onttrekkingsput duidelijker langer en de afstanden waar IJsselmeer wordt aangetrokken korter. Dit komt door het lagere debiet, maar ook doordat de omliggende putten in modelvariant A1 meer invloed hebben. Dit is goed te zien aan het aantal locaties waar vandaan geen stroombanen naar de onttrekkingsput gaan (grijze punten in Figuur 2.28). In het noorden van het IJsselmeer zijn de reistijden naar de put langer. Dit komt door de hogere weerstand (lagere doorlatendheid) in de ondergrond. De stroombanen aan de randen van het IJsselmeergebied blijven stromen in de richting van de polders.

Verder geldt in het algemeen, hoe groter de afstand tot de onttrekkingsput, hoe dieper de stroombanen gaan en hoe langer ze er over doen. Binnen 1.25 km van de put, bereiken de stroombanen vanuit het IJsselmeer een diepte tussen de 5 en 50 meter. Op grotere afstand ligt deze diepte meer in de orde van 25 tot 200 meter.





Figuur 2.28 Leeftijd (jaar), maximaal doorstroomde diepte (m) en afstand vanaf beginpunt (m) voor waterdruppels startend van de freatische (grond)waterstand (modellaag 9) op verschillende afstanden van de onttrekkingsputten. Grijskleuren tonen aan dat er vanaf die afstand geen stroomlijn is naar de onttrekkingsput.

## 2.5 Conclusie en Discussie

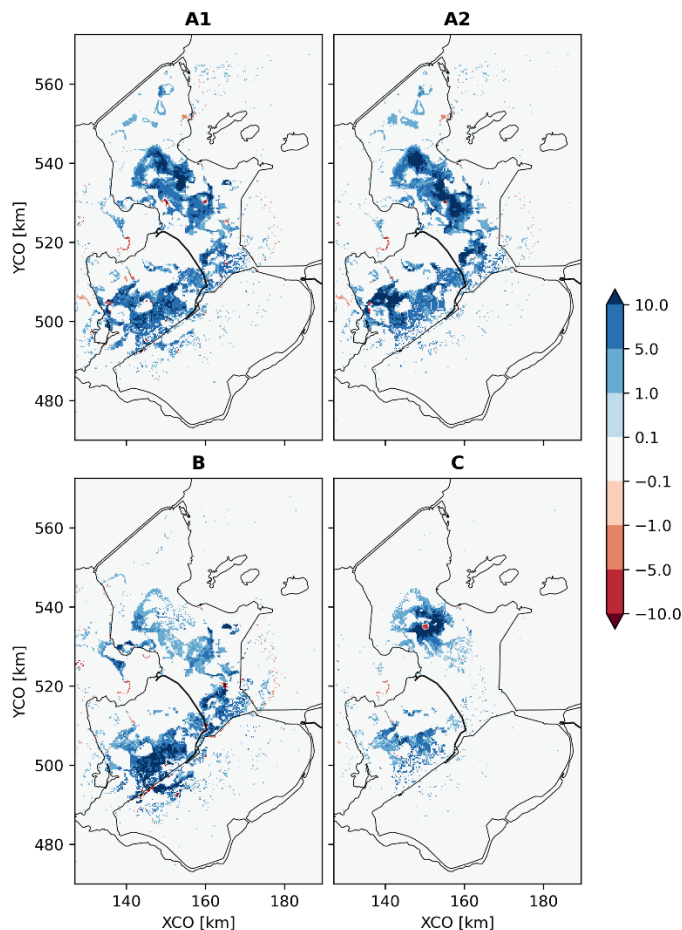
In deze deelstudie is de potentie verkend van het onttrekken van zoet tot brak grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer voor drinkwater. In deze studie is daarbij alleen naar fysische mogelijkheden in termen van hoeveelheden en effecten op het grondwatersysteem gekeken en nadrukkelijk niet naar socio-economische haalbaarheid. De regionale effecten van onttrekkingen op het grondwatersysteem in het IJsselmeergebied zijn berekend met het LHM zoetzout.

### 2.5.1 Potentie van drinkwaterwinning onder het IJsselmeer

Onder het IJsselmeer zijn in potentie grote hoeveelheden zoet tot brak grondwater beschikbaar voor drinkwaterwinning. Deze studie laat zien dat een substantieel deel van de totale drinkwatervraag van Nederland (120-140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar van 820 miljoen m<sup>3</sup> per jaar) kan worden gewonnen zonder dat dit veel negatieve effecten heeft op het regionale grondwatersysteem van het IJsselmeergebied. Hierbij is gekeken naar de effecten als veranderingen van grondwaterstanden en stijghoogtes in omliggende polders, effecten op kwel- en infiltratieflexen en de zoet-zout verdeling in de watervoerende pakketten.

De bestaande grondwateronttrekkingen (voornamelijk gelegen op de hoge zandgronden) hebben een grote invloed op het ondiepe (freatische) watersysteem waarbij grondwaterstanden dalen, kwel naar natuurgebieden vermindert en beekafvoeren afnemen. Immers, elke druppel die wordt onttrokken moet (ergens) van boven worden aangevuld. Het grote voordeel van het onttrekken onder het IJsselmeer en Markermeer is dat deze aanvulling vanuit de meren plaatsvindt en deze aanvulling is slechts een fractie van de aanvoer naar het IJsselmeer, zo'n 1% van de jaarlijkse aanvoer van zoet water door de IJssel. In droge perioden loopt dit op naar ongeveer 2%. Hierdoor zal de grondwateronttrekking van beperkte invloed zijn op het waterpeilbeheer en de totale waterbalans in het IJsselmeer. Uiteraard dient er aandacht te zijn voor extreem droge perioden met hoge verdamping waarin zoutgehaltes van het IJsselmeer toenemen en het waterpeil zelfs kan dalen (Bonte et al., 2023). Mogelijk dat in dit soort extreem droge jaren de winning zal moeten worden teruggeschroefd.

De toenemende infiltratie heeft ook tot gevolg dat, zeker in het zuidelijk deel van het IJsselmeergebied de beschikbare hoeveelheid zoetwater in de ondiepe ondergrond toeneemt (Figuur 2.29). Hier lijkt een duidelijke koppeling met de geologie te zijn. In het zuidelijke deel van het IJsselmeer kan infiltratie van IJsselmeerwater tot grotere dieptes veel makkelijker optreden doordat hier via voormalige getijdengeulen, die de deklaag doorsnijden, contact is met een zeer groot aaneengesloten watervoerend pakket (Figuur 2.9). In het noorden zorgen keileem afzettingen voor een dikke, relatief ondiepe slecht doorlatende laag (Figuur 2.8) die het contact met de diepere watervoerende pakketten beperkt en infiltratie van zoet water naar diepere lagen limiteert. Dit heeft waarschijnlijk tot gevolg dat de op locaties van onttrekkingen dieper en zouter grondwater naar boven wordt getrokken. Hierdoor lijkt het noordelijk deel minder geschikt voor drinkwaterwinning omdat de positieve effecten minder aanwezig zijn; het opkegelen van grondwater is hier sterker aanwezig en de zoutconcentraties van het onttrokken water zijn hoger (>5 g/L chloride). Zoutgehaltes die groter zijn dan 5 g/l chloride worden als minder of niet geschikt geacht voor ontzilting door omgekeerde osmose.



Figuur 2.29 Verandering van de dikte [m] van zoet water in het bovenste watervoerende pakket na 50 jaar onttrekken op basis van de 4 modelscenario's.

Afhankelijk van de locaties van de onttrekkingen nemen de kwelfluxen en daarmee de zoutbelasting in de omliggende polders af. Dit effect is het sterkst wanneer de onttrekkingen gedaan worden langs de zones waar de grootste kwel en infiltratie optreedt: met name de Flevo- en Noordoostpolder en Wieringermeerpolder. Wanneer men dus een dergelijke win-win situatie wil creëren, onttrekken voor drinkwater in combinatie met minder zoute kwel, dan dienen de onttrekkingslocaties zo dicht mogelijk bij de diepe polders worden geplaatst. Echter, hierbij zijn de effecten op de grondwaterstanden in de polders ook het grootst. De grondwaterstandsverlaging die hierbij optreedt is relevant voor het peilbeheer in provincies omdat een verlaging van de grondwaterstand bijvoorbeeld tot gevolg kan hebben dat bodemdalingsgevoelige lagen (veen, niet gerijpte klei) in grotere mate kunnen gaan bijdragen aan bodemdaling.

Qua doorgerekende modelscenario's verschilt het enigszins wat de regionale effecten zijn op het grondwatersysteem in het IJsselmeergebied. Scenario's A1, A2 en B hebben min of meer vergelijkbare effecten direct onder het IJsselmeer en Markermeer maar scenario B heeft hiervan het meeste effect op de omliggende polders (zie kwel, zoutvracht en grondwaterstanden). Scenario C toont aan dat met een onttrekkingshoeveelheid van totaal 40 miljoen m<sup>3</sup> per jaar geen effecten voor de omringende polders optreden. De effecten blijven vrijwel uitsluitend beperkt tot onder het IJsselmeer en Markermeer zelf.

Indien het IJsselmeergebied als aanvullende grondwatervoorraad in gebruik wordt genomen dient afgewogen te worden welk van de scenario's de meeste maatschappelijke en hydrologische voordelen oplevert en wat eventueel acceptabele negatieve effecten zijn. Ook is de technische haalbaarheid van de winningen van belang. Aangezien de scenario's uitgaan van winningen onder een waterbodemplaat levert dit grotere uitdagingen op, bijvoorbeeld wat betreft benodigde infrastructuur ten opzichte van winning op land. Hierdoor kan het zijn dat een modelscenario qua hydrologische voordelen meer geschikt is maar qua haalbaarheid, bijvoorbeeld vanwege het aantal benodigde locaties, minder.

Een ander belangrijk punt betreft het zoutgehalte van het grondwater. Op geen enkele locatie wordt zoet grondwater opgepompt en er zal dus altijd ontzilt water moeten plaatsvinden. Hoewel dit steeds efficiënter kan, zijn de duurzaamheid ervan en de energiekosten nog steeds belangrijke aandachtspunten. Daarnaast is er nog geen duurzame oplossing voor het behandelen of afvoeren van het concentraat dat overblijft na ontzilten.

## 2.5.2 Andere factoren

Buiten de hydrologische effecten van de grondwateronttrekkingen in het IJsselmeergebied zijn andere factoren ook van belang die niet zijn meegenomen in deze studie. Zo hebben de onttrekkingen mogelijke effecten op de waterkwaliteit of zijn er activiteiten (bijvoorbeeld zandwinning; zie Noordhuis et al. 2023) die de infiltratie van IJsselmeerwater in de ondergrond beïnvloeden. Het zouter worden van het onttrekkingswater (sectie 2.4.4) kan mogelijke effecten hebben op de kwaliteit van het omliggende IJsselmeerwater. Onderzocht kan worden wanneer, vanaf welke grens, dit een rol gaat spelen.

Sinds de jaren dertig van de vorige eeuw heeft in het IJsselmeergebied diepe zandwinning plaats gevonden. Deze zandwinputten kunnen dieptes tot circa 40 of zelfs 60 m -NAP bereiken (Noordhuis et al., 2023) waarmee de putten de deklaag doorsnijden wat lokaal de infiltratie significant zal vergroten wanneer grondwater wordt onttrokken. Indien mogelijke zandputten in het noordelijk deel van het IJsselmeer dit soort dieptes zouden bereiken, doorsnijden ze ook de slecht doorlatende keileem laag (sectie 2.5.1) waarmee ook in het noordelijk deel de connectie met dieper liggende watervoerende pakketten vergroot zou worden.

Echter, in diepere delen vindt ook weer accumulatie van sediment plaats (Noordhuis et al., 2023), wat lokaal de weerstand van de deklaag ook weer kan vergroten omdat in het IJsselmeer dit met name fijn sediment zal zijn. Gedetailleerde lokale kennis van de ondergrond op locaties van de putten is hierom van belang om een uitspraak te doen wat het exacte effect hiervan zal zijn.

Ook is in de modelscenario's het effect van zeespiegelstijging niet meegenomen. Delsman et al. (2022) laten zien dat bij een toenemende zeespiegelstijging, de zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer en polders toe neemt. Hierdoor zijn de positieve effecten van het afnemen van de zoutbelasting op de polders enigszins een overschatting. Wanneer de effecten van zeespiegelstijging mee worden genomen in de scenario's kan het dus zijn dat op sommige plekken de zoutbelasting in de polders juist toe in plaats van afneemt. Echter zal dit op basis van de resultaten van Delsman et al. (2022) het meeste van belang zijn in de Wieringermeerpolder omdat hier de grootste effecten van zeespiegelstijging worden berekend. In scenario B laten onze resultaten bijvoorbeeld een afname van 14% van de zoutbelasting zien (2.5). Afhankelijk van de zichtwaarde van zeespiegelstijging (0.5, 1 of 3 m) kan het zijn dat deze afname volledig gecompenseerd wordt of dat de zoutbelasting zelfs toeneemt. Natuurlijk is dit niet direct te zeggen op basis van beide resultaten en zou dit in een modelstudie waarbij beide factoren worden meegenomen (onttrekking + zeespiegelstijging) onderzocht moeten worden. Echter, er wordt wel verwacht dat zonder onttrekkingen de zoutbelasting meer toeneemt door zeespiegelstijging dan met onttrekkingen.



## 3 Potentie van kwelgebieden

### 3.1 Inleiding

Kwelwater is grondwater dat aan het oppervlak uittreedt en is een potentiële bron voor drinkwater. In hoog-Nederland is dit kwelwater meestal zoet en in laag-Nederland kan dit kwelwater brak of zout zijn. Een groot voordeel van kwelwater is dat het vaak 'oud' grondwater betreft en waardoor de kwaliteit nauwelijks of niet door de mens beïnvloed is en er dus geen microverontreinigingen inzitten. Er kunnen wel nutriënten (ammonium en fosfaat) in het kwelwater zitten. Dit komt met name in laag-Nederland voor en gaat vaak gepaard met brakke kwel dat per definitie een RO (Reverse Osmose) behandeling moet ondergaan om het geschikt te maken voor drinkwater.

Kwelwater dat aan het oppervlak is uitgetreden, wordt vervolgens afgevoerd richting de zee en kan in die zin een belangrijke extra bron voor drinkwater zijn. Echter, er zijn ook andere functies afhankelijk van kwelwater zoals bijzondere en vaak zeldzame grondwaterafhankelijke natuur waar rekening mee moet worden gehouden. Dit kwelwater is dan alleen beschikbaar als het geen nadelige effecten voor de natuur te weeg brengt.

Momenteel wordt het kwelwater uit de Bethunepolder al ingezet voor de drinkwaterbereiding door Waternet. Friesland heeft plannen om de inzet van kwelwater te onderzoeken.

Een andere manier is om gebruik te maken van kwelwater is grondwater te onttrekken voordat het als kwelwater aan het oppervlak uittreedt. Waternet onderzoekt de mogelijkheden om brak grondwater te onttrekken onder de Horstermeer. Door dit te onttrekken komt er minder brakke kwel aan de oppervlak waardoor tevens de verzilting van de polder wordt tegengegaan. Brakwaterwinning uit polders (MT-polder) is ook in het COASTAR project verkend. Ook aan de voet van Brabantse Wal wordt nagedacht om kwelwater op deze manier in te zetten voor drinkwater.

Tot slot wordt er in deze studie ook gekeken naar de potentie van onttrekkingen onder *veenplassen*. In tegenstelling tot diepe polders zijn deze plassen na vervening niet drooggelegd. Deze plassen zijn met name te vinden in het veenweidegebied van Zuid-Holland, Utrecht en Friesland. De veenplassen functioneren als infiltratiegebieden, waar oppervlaktewater freatisch het dieper grondwater aanvult dat in de aangrenzende lageregelegen polder opkwelt. Een winning onder een veenplas is vergelijkbaar met oeverinfiltratie, waarbij indien de winning goed wordt ingericht, oppervlaktewater uit de plas wordt aangetrokken. De bodempassage die hierbij plaatsvindt zorgt voor een initiële zuivering van het water. Het onttrekken van grondwater onder de veenplassen is ook zeer vergelijkbaar met het onttrekken onder het IJsselmeer zoals in Hoofdstuk 3 is beschreven, maar dan op kleinere schaal.

### 3.2 Type kwelgebieden en bestaande winningen

#### 3.2.1 Kwel

Kwel is het verschijnsel waarbij grondwater vanuit een dieper gelegen watervoerend pakket opwelt naar een oppervlaktewatersysteem. In laag-Nederland betreft kwel over het algemeen de aanvoer van grondwater vanuit het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket via de Holocene deklaag naar het oppervlak. De kwelflux door de deklaag kan als volgt worden berekend (wet van Darcy):

$$q_z = \frac{\Delta\phi}{c}$$

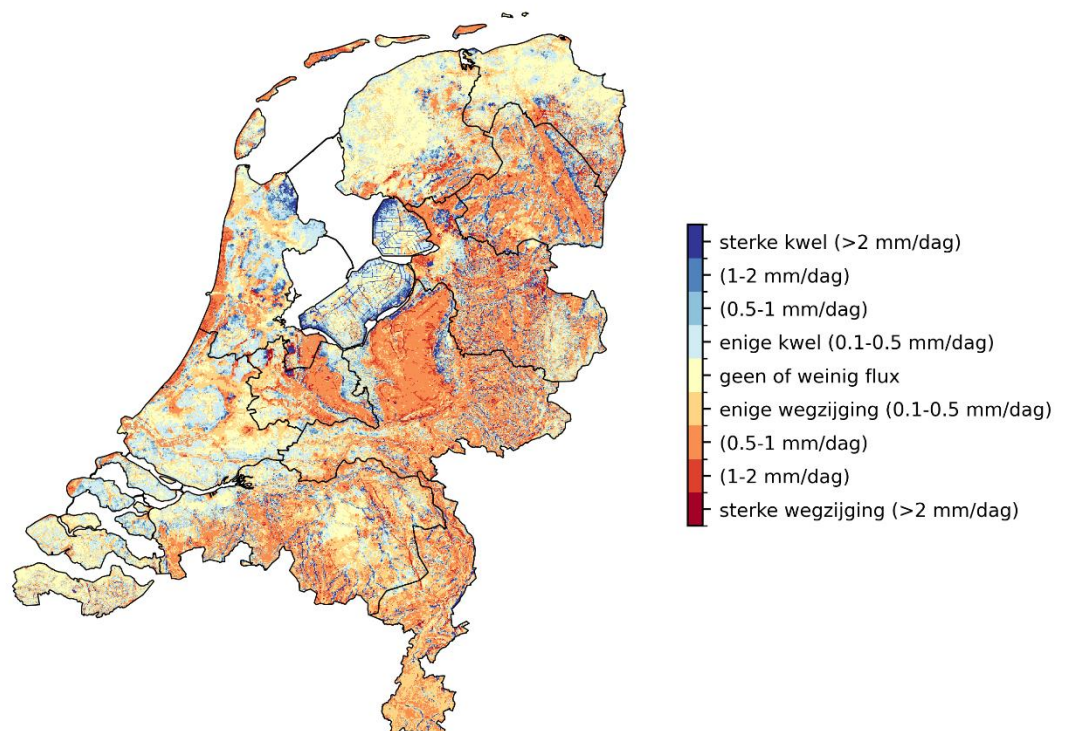
Hierin is:

- $q_z$  : de verticale grondwaterflux, ofwel kwel, door de deklaag;
- $\Delta\phi$  : stijghoogteverschil tussen stijghoogte in watervoerend pakket en freatisch waterpeil (bijv. polderpeil of grondwaterstand);
- $c$  : de weerstand van de deklaag.

Het wel of niet optreden van kwel en de grootte ervan hangt dus af van de 1) stijghoogte in het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket, 2) het polderpeil en de grondwaterstand, en 3) de weerstand van de Holocene deklaag. In gebieden met sterke kwel is dus sprake van een relatief laag polderpeil, een hoge stijghoogte in het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket en/of een lage weerstand van de Holocene deklaag (Oude Essink & de Louw, 2017). Grondwater stroomt langs de weg van de minste weerstand, in sommige gevallen betekent dit dat het grootste deel van het kwelwater niet via de slecht doorlatende deklaag komt, maar via preferente stroombanen, zoals oude zandbanen. In sommige gevallen is de kweldruk dermate hoog dat een deel van de ondergrond omhoog wordt gedrukt (opbarsting) waardoor scheuren ontstaan en waardoor water uit het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket relatief snel naar het oppervlak kan stromen. Dit worden wellen genoemd. Door de grote snelheid trekken wellen dieper en daardoor ook zouter grondwater aan (De Louw et al., 2010; De Louw, 2013). Zout grondwater komt voornamelijk in het westen en noorden voor, waar zout zeewater tijdens Holocene transgressies in de ondergrond is geïnfiltrerd. Daar waar dit zoute grondwater aan de oppervlakte komt is er dus sprake van zoute kwel. Zoute kwel is ongewenst en veroorzaakt verzilting van het oppervlaktewater, ondiep grondwater en soms bodemwater in de wortelzone, waardoor er schade aan gewassen kan ontstaan (Oude Essink & De Louw, 2017).

Figuur 3.1 laat zien dat kwel in de kustvlakte voornamelijk in laag gelegen gebieden, zoals de dieper liggende polders ten opzichte van de omgeving en de droogmakerijen en in het zuiden en oosten van Nederland in beekdalsystemen.

### Kwel- en wegzijgingsflux



Figuur 3.1: Kwel- en wegzijgingskaart bereken met het LHM zoet-zout (versie 4.1). De blauwe gebieden op de kaart zijn kwelgebieden, en de rode gebieden wegzijgingsgebieden.

Er zijn verschillende indelingen van zoet, brak en zoutgrondwater. In deze studie worden de volgende grenzen gehanteerd.

- Zoet grondwater: minder dan 150 mg Cl<sup>-</sup> per liter, wat overeenkomt met norm voor chloride in drinkwater (Helpdesk Water, 2019);
- Brak grondwater: Tussen de 150 mg Cl<sup>-</sup> per liter en 5000 mg Cl<sup>-</sup> per liter. Water met dit chloridegehalte kan nog kostenefficiënt worden omgezet in zoet water (COASTAR, 2023).
- Sterk brak en zout grondwater: Meer dan 5000 mg Cl<sup>-</sup> per liter. Dit water is daardoor nauwelijks geschikt voor een kosteneffectieve drinkwaterproductie.

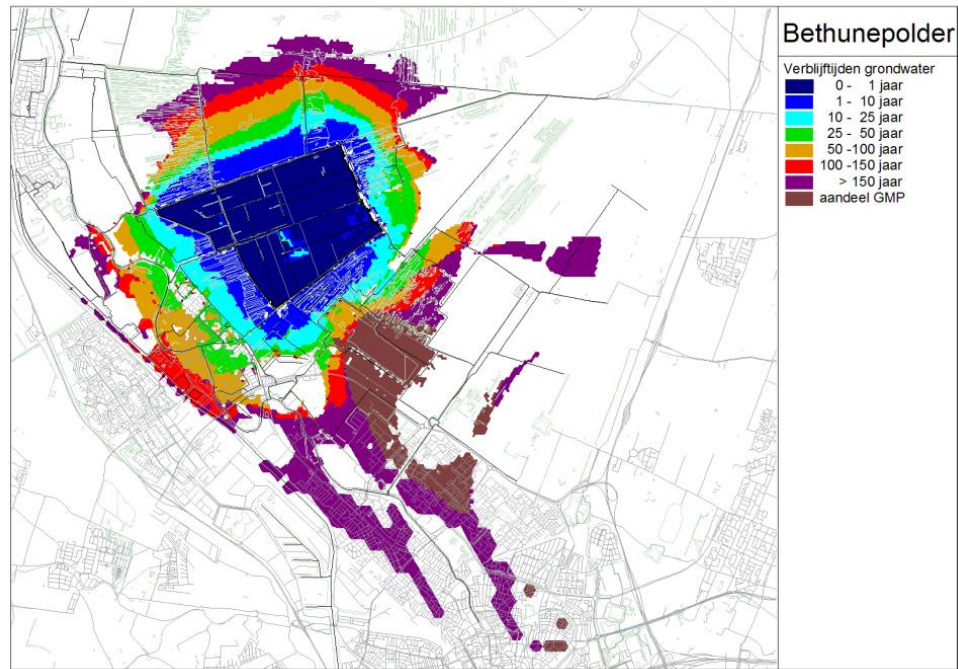
### 3.2.2 Type kwelgebieden in Nederland

In laag-Nederland komt kwel voor in o.a. de dieper gelegen polders en in het zandgebied zijn de kwelgebieden veelal te vinden in de relatief smalle en regionaal lager gelegen beekdalen en aan de voet van hoger gelegen zandruggen zoals de stuwwallen, dekzandruggen en de Brabantse Wal. De kwel in beekdalen wordt in deze studie buiten beschouwing gelaten omdat er vaak kwel afhankelijke kwetsbare natuur aanwezig is en winningen hier niet realistisch zijn. Daarnaast betreft het langgerekte en relatief smalle gebieden waarin de beken water afvoeren uit een groot stroomgebied met veel landbouw beïnvloed water.

*Diepe polders* zijn vaak voormalige veengebieden die na vervening zijn drooggelegd (ook wel droogmakerijen). Hierdoor bevinden deze polders zich vaak op een (veel) lager niveau dan de omgeving. Bovendien is een deel van de weerstand van de deklaag verminderd door het afgraven van veen. Een groot deel van het kwelwater komt via preferente stroompaden direct in het oppervlaktewater terecht (Becker et al., 2004). In sommige gevallen gaat kwel gepaard met opbarsten en ontstaan er zoute wellen, welke soms tot wel meer dan 60 procent van het zoute water in het oppervlaktewater kunnen aanvoeren (De Louw, 2013). In veel diepe polders in West Nederland is het diepe kwelwater brak of zout (Wesseling, 1980).

Een voorbeeld van een diepe polder met sterke zoete kwel is de Bethunepolder. Hier is door veenontginning meer dan 2 meter veendeklaag verdwenen, wat vooral merkbaar is in het zuidoostelijke deel waar de bodem bedekt is met dekzand en nauwelijks veen overblijft. Onder deze dunne deklaag bevindt zich het 1e watervoerende pakket bestaande uit de formaties van Boxtel, Kreftenheye en Urk. In het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket is sprake van een (zuid)westelijke grondwaterstroming vanaf de Utrechtse Heuvelrug naar het Amsterdam-Rijnkanaal en de lagere gelegen westelijke veenweidegebieden. Dit resulteert in aanzienlijke kweldruk in de Bethunepolder, vooral in de randzone (Royal HaskoningDHV & Witteveen+Bos).

Aangezien in sommige delen van de polder de sloten tot in het dekzand snijden, komt de kwel voornamelijk via het netwerk van watergangen in de polder omhoog. Op sommige plaatsen bedraagt de kwelflux meer dan 20 mm/dag. Een deel van het kwelwater komt rechtstreeks uit de omgeving, maar er wordt ook water aangetrokken van grotere dieptes en afstanden. Figuur 3.2 is afkomstig van een studie van Waternet (2013) en toont de verblijftijden van het grondwater dat richting de Bethunepolder stroomt (Royal HaskoningDHV & Witteveen+Bos).



Figuur 3.2: Verblijftijden in jaren van winning Bethunepolder op basis van berekeningen uitgevoerd door Waternet (2013), verkregen uit gebiedsstudie Bethunepolder (Royal HaskoningDHV & Witteveen+Bos).

*Kwel naast hogere gelegen gebieden:* Hoger gelegen zandgronden vormen door hun hoge ligging en afwezigheid van sloten regionale infiltratiegebieden vanuit waar grondwater naar diepere watervoerende pakketten en lateraal naar de omgeving stroomt. Aan de flanken van deze hoger gelegen infiltratiegebieden treedt door het grote verschil in grondwaterstanden (grote grondwatergradiënt) een sterke kwelstroming op. Deze kwel komt aan de oppervlak en wordt via slotjes en waterlopen verder afgevoerd.

Op deze wijze ontvangen gebieden zoals het gebied tussen de Veluwe en het Veluwerandmeer, en het gebied tussen de Loosdrechtse plassen en de Utrechtse Heuvelrug, kwelwater. Ook komt aan de voet van de Brabantse Wal zoet kwelwater uit de hoger gelegen Brabantse Wal aan het oppervlak. Aangezien dit water vrijwel direct afstroomt naar de zoute Westerschelde, voeren de Zuidwestelijke Delta Waterschap en waterwinbedrijf Evides onderzoek uit naar de winbaarheid van dit kwelwater voor drinkwaterproductie.

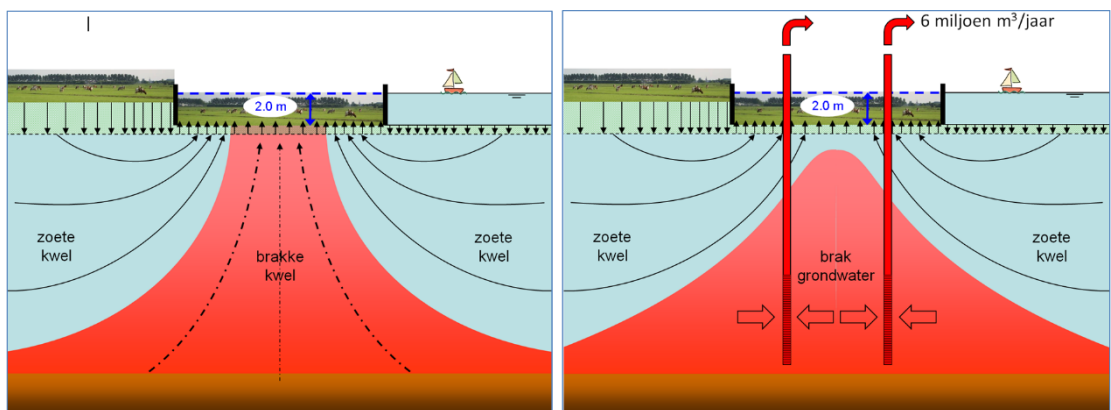
### 3.2.3 Winbaarheid van kwelwater

Indien kwelwater geen of juist een nadelige functie heeft, kan het worden gebruikt voor de productie van drinkwater. Op dit moment wordt kwelwater nog niet veel ingezet voor de productie van drinkwater. Het meest bekende voorbeeld in Nederland is de Bethunepolder, waar via een oppervlaktewaterwinning ca. 30% van het drinkwater bestemd voor Amsterdam wordt gewonnen. Meer recent wordt ook elders in Nederland gekeken naar het onttrekken van (brak) grondwater uit de ondergrond, nog voordat het als kwel het oppervlaktewatersysteem heeft bereikt. Bij de keuze voor een specifieke winmethode zijn de neveneffecten en risico's van belang. Dit wordt hieronder toegelicht aan de hand van twee praktijkvoorbeelden.

*Oppervlaktewaterwinning:* De intensieve bemaling van de Bethunepolder om overtollig kwelwater af te voeren leidde in 1930 tot het besluit om dit water voor drinkwaterproductie te benutten. Tegenwoordig wordt jaarlijks 28 miljoen m<sup>3</sup> gewonnen in de Bethunepolder (Royal HaskoningDHV & Witteveen+Bos). De kwel komt veelal direct in het oppervlaktewatersysteem terecht en wordt inclusief het neerslagoverschot naar een winningsplas geleid, waar het verder wordt verwerkt.

Dit type winning heeft het voordeel dat het relatief goedkoop is. De bemaling van de polder gebeurt immers ook vanuit peilbeheer, waardoor de infrastructuur grotendeels al aanwezig is. Er bestaat echter wel een hoog risico op verontreiniging van het oppervlaktewater. Veel percelen binnen de grondwaterbeschermingszones van de Bethunepolder hebben een agrarische functie. Om het risico op verontreinigen te beperken is het gebruik van bestrijdingsmiddelen verboden. Desalniettemin overschrijden diverse stoffen en bacteriologische verontreinigen de normen zoals vastgesteld in de drinkwaterregelgeving (Royal HaskoningDHV & Witteveen+Bos). Bovendien ondergaat het gewonnen water momenteel een relatief uitgebreid zuiveringsproces dat bestaat uit zeven stappen, wat meer is dan bij een reguliere grondwaterwinning.

*Diepe onttrekking:* Een ander type winning is het diep onttrekken van (brak) grondwater voordat het als kwel het oppervlak bereikt. Op dit moment zijn er nog geen operationele drinkwaterwinningen die gebruik maken van deze methodiek, maar Waternet start in 2024 met een praktijkproef van het onttrekken van brakke kwel onder de Horstermeerpolder. De Horstermeerpolder ligt ten zuidoosten van Amsterdam in het Vechtplassengebied. De polder is een voormalige zoetwaterplas en is eind 19<sup>e</sup> eeuw drooggelegd. Aan de randen van de polder komt zoet grondwater omhoog vanuit hoger gelegen gebieden, terwijl in het midden zout grondwater van grote diepte naar boven komt en zorgt voor verzilting van de polder. Deze zoute kwel is nadelig voor zowel de natuur als de landbouw in de omgeving (Winnovatie, 2020).

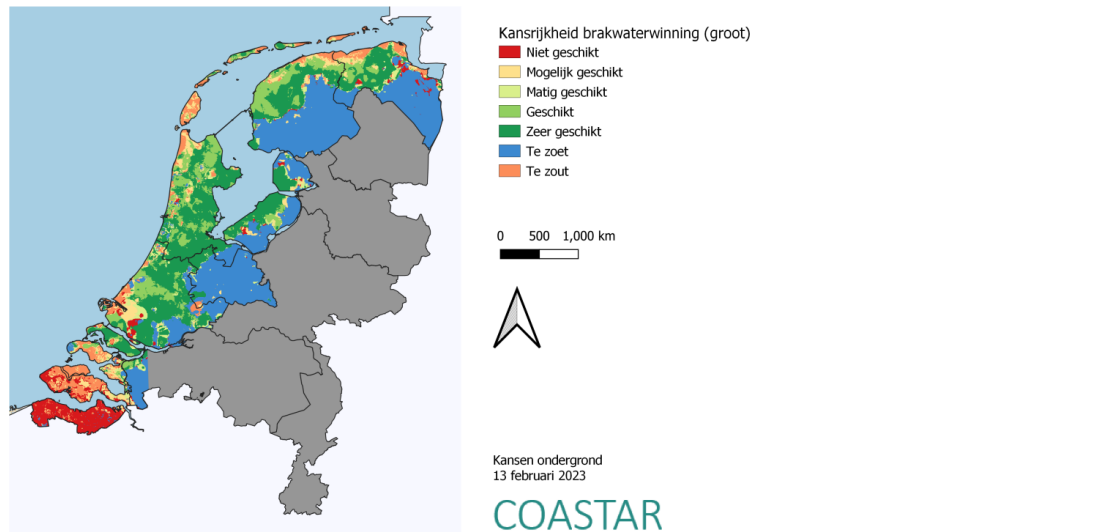


*Figuur 3.3: links: huidige situatie, brak grondwater kwelt op in de polder. Rechts: voorgestelde situatie: door de onttrekking van brak grondwater blijft het water in de polder zoet (Waternet, 2020). Dit brakke grondwater kan worden ingezet voor de productie van drinkwater na ontzilting.*

Als mogelijke oplossing onderzoekt Waternet de diepe onttrekking van brak grondwater om te voorkomen dat zout water de polder bereikt om zo de waterkwaliteit te verbeteren (Figuur 3.3). Daarnaast wordt onderzocht of dit brakke water geschikt is voor drinkwaterproductie (Winnovatie, 2020).

Voor COASTAR is een kanskaart voor brakwaterwinning opgesteld waarbij het niet uitsluitend over kwelgebieden gaat. Het zoutgehalte van het grondwater was de belangrijkste factor die de kansrijkheid bepaalde. In deze studie wordt het water met een zoutgehalte lager dan 10.000 mg/l chloride als geschikt geacht. Daarnaast is gekeken naar andere factoren zoals de dikte van het brakwaterpakket, het doorlatend vermogen van de ondergrond en de maximale diepte van de bovenkant van het brakwaterpakket (Figuur 3.4).

# Kansrijkheid Brakwaterwinning



Factor	Criteria	Beoordeling	Duiding
A. Gemiddelde Cl-concentratie brakwaterpakket	Cl-conc: 150 – 5000 mg/l	2	goed voedingswater voor omgekeerde osmose met lage- en middeldrukmembranen
	Cl-conc: 5000 – 10.000 mg/l	1	Redelijk tot goed voedingswater voor omgekeerde osmose met lage- en middeldrukmembranen; concentratieroom wellicht lastiger te lozen
B. Dikte brakwaterpakket	Cl-conc: < 150 mg/l	0 (te zoet)	zoetwater
	Cl-conc: > 10.000 mg/l	0 (te zout)	te zout voor lage- en middeldrukmembranen, zuivering kost veel energie
	Dikte > 30m	2	voldoende dikke laag voor grote grondwaterwinning
	Dikte: 15m - 30m	1	mogelijk voldoende dik pakket voor grote grondwaterwinning (bij voldoende doorlatendheid, zie C.)
C. Doorlatend vermogen	Dikte < 15m	0	te dunne laag voor grote grondwaterwinning
	KD > 500 m <sup>2</sup> /d	2	relatief grote winningscapaciteit
	KD > 200 m <sup>2</sup> /d	1	matige winningscapaciteit
	KD < 200 m <sup>2</sup> /d	0	te kleine winningscapaciteit
D. Maximale diepte bovenkant brakwaterlaag	Doorlatendheid k < 5m/d	0	te kleine winningscapaciteit
	Diepte 50 - 200 m	2	goed diepte interval voor grondwaterwinning
	Diepte < 50 m	1	minder gunstig vanwege mogelijke interferentie met andere gebruikers (landbouw)
	Diepte > 200 m	0	relatief diep en dus kostbaar

A	B	C	D	Geschiktheid	Duiding
2	2	1	2	zeer geschikt	Optimale omstandigheden
>0	1	1	2	Geschikt	Locatie gevoelig voor opdrrijving + achtergrondstroming
>0	>0	1	1	Matig Geschikt	Locatie gevoelig voor opdrrijving + achtergrondstroming + beperkte transmissiviteit
0	2	1	2	Mogelijk geschikt (kans groot)	Hoge stroomsnelheid, verder optimaal
0	1	1	2	Mogelijk geschikt (kans redelijk)	Hoge stroomsnelheid en gevoelig voor opdrrijving
0	1	1	1	Mogelijk geschikt (kans klein)	Hoge stroomsnelheid en gevoelig voor opdrrijving en beperkte transmissiviteit
A=0	B=0	C=0	D=0	Niet geschikt	Minimaal 1 factor ontoereikend

Figuur 3.4 Geohydrologische geschiktheidskaart voor brakwaterwinning (BW); bron [Kansrijkheid brakwaterwinning \(coastar.nl\)](https://kansrijkheid-brakwaterwinning.coastar.nl)

## 3.3 Methode

Om inzicht te krijgen in kwel als potentiële grondwatervoorraad en de winbaarheid van kwelwater voor de productie van drinkwater zijn de volgende analyses uitgevoerd.

1. Kwel in Nederland: om inzicht te krijgen in het totaal potentiaal van kwelwaterwinningen t.b.v. drinkwaterwinning zijn de kwelvolumes, -waterkwaliteit en kansrijke gebieden in beeld gebracht voor laag-Nederland (maaierveld < 1 m NAP).
2. Oppervlaktewaterwinning: Deze analyse richt zich op de potentie en voor- en nadelen van het winnen van kwel via het oppervlaktewatersysteem.
3. Diepe kwelonttrekkingen: Deze analyse geeft inzicht in de winbaarheid van (brak) grondwater via diepe onttrekkingen en de mogelijke positieve en negatieve neveneffecten van zo'n winning op de omgeving.

Tot slot is ook de winbaarheid van ondiep grondwater onder veenplassen en de mogelijke effecten daarvan onderzocht. Hoewel deze plassen geen kwelgebieden zijn maar infiltratiegebieden, voeden ze wel de kwel in omliggende polders en betreft het een nog niet aangeboorde grondwatervoorraad. Het onttrekken van water onder een relatief groot watervlak zorgt ervoor dat er constant water beschikbaar is voor de aanvulling, en de bodempassage draagt bij aan een eerste zuivering van het water.

### 3.3.1 Modelinstrumentarium

Langjarige berekeningen zijn uitgevoerd met de laatste versie van het landsdekkend zoet-zout grondwatermodel (LHM zoet-zoutmodel versie 4.1; America et al., 2021; Delsman et al., 2023). Met dit model kunnen zowel kwelstromen als de zoutvracht van kwelstromen in beeld worden gebracht. Daarnaast is het mogelijk om effecten van (brakke) kwel onttrekkingen op de omgeving te kwantificeren, zoals effecten op grondwaterstanden, stijghoogten in diepere watervoerende pakketten, kwel- en wegzijgingsfluxen en de verandering in zoet-zout grondwater verdeling.

Het LHM zoet-zout berekent de langzame verplaatsing van grondwater en daarin opgelost zout in het Nederlandse grondwatersysteem op een tijdschaal van decennia tot eeuwen. Dit model berekent op nationale schaal de stroming van zoet en zout grondwater, en is geschikt om landsdekkende verziltingsstudies mee uit te voeren ter ondersteuning van lange-termijn beleidsvorming op landelijk niveau. Het model is gericht op de simulatie van gemiddelde situaties doordat een gemiddelde grondwateraanvulling gebruikt wordt als modelinvoer. Het model heeft een horizontale resolutie van 250x250 meter. De stroming en zoutvracht van het eerste watervoerende pakket naar de deklaag (modellaag 10) vormt de relevante output voor deze studie (onderkant Holoceen).

### 3.3.2 Analyse kwel in Nederland

Het LHM-modelinstrumentarium is gebruikt om de hieronder aangegeven kwelparameters in laag-Nederland (gebaseerd op de kustvlakte zone uit (Erkens en Melman, 2020), de zone vanaf de kust tot aan waar het natuurlijk maaiveld hoger ligt dan 1 m NAP, rood in Figuur 3.5) te inventariseren per provincie. Er is voor gekozen om deze analyse te beperken tot laag-Nederland, omdat kwelgebieden in hoog-Nederland vaak kwel afhankelijke kwetsbare natuur kennen en winningen hier niet realistisch zijn.

- Kwelvolumen: Gebaseerd op gemodelleerde representatieve kwelvolumes per dag, omgezet naar een jaarlijks volume en onderverdeeld in de volgende zoutwaterklassen: zoetwater (<150 mg Cl<sup>-</sup>/L), licht brak water (>150 & <1000 mg Cl<sup>-</sup>/L), sterk brak water (>1000 & <5000 mg Cl<sup>-</sup>/L) en zoutwater (>5000 mg Cl<sup>-</sup>/L).
- Zoutconcentratie: De chlorideconcentratie van opwellend kwelwater, berekend op basis van het gewogen gemiddelde van alle modelcellen voor kwel, waarbij het gewicht wordt bepaald door het inkomende kwelvolumen.
- Zoutvracht: Totaal gemodelleerd opwellend zout via diffuse kwel en kwelwellen per dag, omgezet naar een jaarlijks gewicht.
- Kwelareaal: Het totale gebied waar jaarlijks gemiddeld netto kwel optreedt (met een kwelvolumen groter dan 0) in het model.
- Seizoensgebonden kwelflux: Aangezien met het LHM zoet-zout geen informatie kan worden verkregen over de seizoensgebonden variatie in het kwelvolumen, is het reguliere LHM-model (versie 4.2) gebruikt om het gemiddelde dagelijkse kwelvolumen per provincie te berekenen voor de zomermaanden (juni tot en met augustus) en de wintermaanden (december tot en met februari). Structurele seizoensgebonden verschillen in kwelsterkte kunnen relevant zijn voor de stabiliteit van een winning.



Figuur 3.5 De zone vanaf de kust tot aan waar het natuurlijk maaiveld hoger ligt dan 1 m NAP (rood) (Erkens en Melman, 2020).

De landelijke kwel informatie is gebruikt om een selectie te maken van kansrijke kwelgebieden voor de winning en productie van drinkwater. Hiervoor zijn de volgende drie criteria in beschouwing genomen:

- *Totale kwelvolumen*: Om als gebied aantrekkelijk te zijn voor een drinkwaterwinning, moet er sprake zijn van een minimale aanvoer van kwel per jaar. Bestaande drinkwaterwinningen uit de ondergrond variëren in de regel tussen de 1 en 10 miljoen m<sup>3</sup> water per jaar (Rijkswaterstaat, n.d.). Voor deze studie is daarom een onderrandvoorwaarde van 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar gehanteerd. Indien het om een onttrekking uit de ondergrond gaat, is het bovendien van belang dat er relatief sterke kwelflux is, omdat de effecten op de omgeving dan kleiner zullen zijn. Er is daarom een onderrandvoorwaarde van 0.5 mm/dag aangehouden.
- *De zoutconcentratie van de kwel*: afhankelijk van het gebied kan kwel als zoet-, brak- of zoutwater aan het oppervlak komen. Dankzij de opkomst van kosteneffectieve ontziltingstechnieken, kan tegenwoordig ook brakke kwel worden gebruikt voor drinkwaterproductie. In sommige gevallen is brakke kwel zelfs meer geschikt dan de zoete kwel, doordat het door ouderdom van het water geen antropogene verontreinigen bevat (Coastar, n.d.). Afhankelijk van de zoutconcentratie kan ongeveer 50-75% van het brakke kwelwater worden omgezet in hoogwaardig zoetwater met weinig verdere behandeling (Pouwels et al., 2018). Het vrijkomende zoutwaterconcentraat is bij een relatief lage recovery (50%-75%) minder zout dan zeewater en kan daarom worden geïnjecteerd in diepere waterlagen, naar zee worden afgevoerd of worden hergebruikt, bijvoorbeeld voor zoutproductie (Beerendonk, 2014). Echter, of deze oplossingen voor het concentraat geen nadelige gevolgen hebben voor de omgeving (inclusief ondergrond) is onderwerp voor toekomstig onderzoek. Bij kwel met te hoge zoutconcentraties is ontzilting niet langer kostenefficiënt of wordt het lastiger om het concentraat te lozen. In deze studie wordt daarom kwelwater tot zoutconcentratie 5000 mg Cl<sup>-</sup>/L in beschouwing genomen.



- *(Neven)functies kwelwater*: In de zandgebieden kan kwel door zijn basenrijke en voedselarme karakter belangrijke condities scheppen voor bijzondere kwelafhankelijke flora en fauna. Zo speelt kwel een belangrijke rol in de beekdalen van de zandgebieden en op de flanken en aan de voet van stuwwallen zoals de Veluwe. Daarnaast zijn door de natte omstandigheden in sommige kwelrijke gebieden gedurende het Holoceen veengebieden ontstaan, die nog steeds deels afhankelijk zijn van kwelaanvoer voor hun voortbestaan. Niet alle gebieden zijn daarom geschikt voor kwelwaterwinning. Meer geschikte gebieden voor kwelwaterwinning zijn o.a. diepe polders waar (brakke) kwel grotendeels wordt afgevoerd naar boezemsystemen, of gebieden waar kwel vrijwel direct afstroomt via het oppervlaktewater, zoals aan de voet van de Brabantse Wal en langs het Veluwerandmeer.

Met behulp van modelresultaten van het zoet-zout grondwatermodel, is gekeken welke kwelgebieden mogelijk voldoen aan bovenstaande criteria. Aangezien de modelresultaten informatie verstrekken op een resolutie van 250x250 meter en niet specifiek voor individuele winningseenheden, zoals een diepe polder, dienen ze voornamelijk als basis voor handmatige selectie van kansrijke kwelgebieden. Bovendien maakt de basis voor het derde criterium geen deel uit van de modeloutput.

### 3.3.3 Analyse oppervlaktewater winning

De winning van kwelwater via het oppervlaktewatersysteem is interessant als er door de aanvoer van kwel sprake is van een netto wateroverschot welke afgevoerd moet worden. Dit overschot kan worden ingezet voor de productie van drinkwater. Of er sprake is van een netto overschot hangt af van de waterbalans van een gebied, die voornamelijk wordt beïnvloed door inkomende stromen, zoals neerslag en kwel, en uitgaande stromen, zoals gewasverdamping en infiltratie.

Voor de geselecteerde diepe kwelpolders is deze waterbalans opgesteld om de duur en omvang van het netto overschot te bepalen en zo te beoordelen welke gebieden geschikt zijn voor kwel- oppervlaktewaterwinning. Een kwelgebied kan bijvoorbeeld tijdens de zomerperiode water verliezen omdat de verdamping dan groter is dan de kwelflux en daarmee niet geschikt is voor een jaarronde winning. Hierbij zijn de volgende aannames toegepast:

- De netto kwelflux van een gebied is berekend met het LHM zoet-zout, en wordt representatief geacht voor het jaargemiddelde. Er wordt geen rekening gehouden met seizoensgebonden of jaarlijkse variatie van de kwelflux. Dit wordt immers niet door het zoetzout-model gekwantificeerd.
- Het neerslagoverschot (neerslag – verdamping) volgt uit landelijke neerslag- en gewasverdampingskaarten, welke door het KNMI zijn ontwikkeld voor het LHM op basis van geïnterpoleerde neerslag en verdampingsmetingen. Deze kaarten hebben een resolutie van 1000 m x 1000 m (Janssen et al., 2020).
- Het totale overschot (neerslag + kwel) binnen een winningsperiode kan worden ingezet voor drinkwaterproductie. Overige componenten van de waterbalans, zoals peilbeheer, beregening, etc. worden niet meegenomen.

### 3.3.4 Analyse diepe onttrekking

Het doel van deze analyse is om inzicht te krijgen in de potentie en de effecten van diepe (brakke) kwelonttrekkingen. Voor een aantal geselecteerde kwelgebieden met een kwelvolume van ongeveer 4 miljoen m<sup>3</sup> of meer zijn twee onttrekkingsscenario's doorgerekend met behulp van het zoet-zout landelijk grondwatermodel:

- 1) In het eerste scenario zijn onttrekkingen met elk een jaarlijks debiet van 4 miljoen m<sup>3</sup> geplaatst. Het aantal onttrekkingen (totaal debiet) is zo veel mogelijk afgestemd op het kwelvolume met als doel ongeveer dezelfde hoeveelheid te onttrekken als er kwel in de polder optreedt. Voor grote kwelgebieden, zoals de Flevopolder en Noordoostpolder, waar de kwel sterk verspreid over een groot gebied aan het

oppervlakte komt, is niet het volledige kwelvolume als bovengrens gebruikt, maar een lager totaalvolume (zie Tabel 3.1).

- 2) Het tweede scenario behoudt hetzelfde aantal onttrekkingslocaties als in het eerste scenario. Echter, in dit geval is het onttrekkingsdebiet beperkt tot 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar om ook effecten van veel lagere onttrekkingsvolumes in beeld te brengen. Deze specifieke berekening is alleen uitgevoerd voor de diepe polders.

Deze berekeningen bieden inzicht in de mogelijke effecten van verschillende onttrekkingsniveaus. Het aantal onttrekkingen per kwelgebied is weergegeven in Tabel 3.1 en de onttrekkingslocaties in Figuur 3.6.

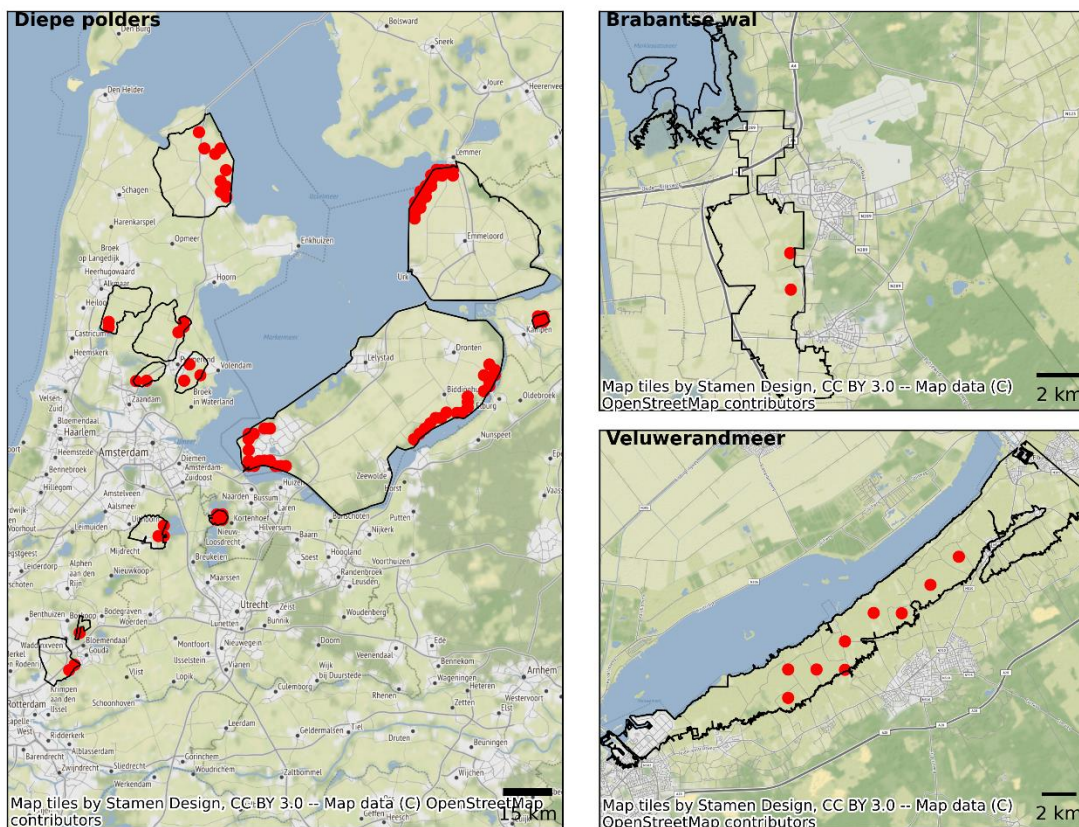
De analyse is uitgevoerd voor de periode 2020-2070. Veranderingen ten aanzien van zeespiegelstijging en meteorologische veranderingen door klimaatverandering zijn niet meegenomen. De scenario's zijn doorgerekend met een grondwateraanvulling dat representatief is voor het huidige klimaat. Een periode van 50 jaar is doorgerekend omdat dit voldoende inzichten biedt in effecten op de zoutwaterverdeling en het zoutgehalte van het pompwater.

De winningen zijn geplaatst onder de eerste weerstand biedende laag. In het model is dit model laag 11. Er is aangenomen dat het filter niet langer is dan 10 meter. Wanneer het watervoerende pakket dunner is dan 10 meter, is het filter hierop aangepast. In Bijlage 6B is meer informatie te vinden over de schematisatie van de winningen. Het kan voorkomen dat een onttrekking in meerdere modellagen aanwezig is. Wanneer dit plaatsvindt wordt het debiet gelijkmatig verdeeld over de modellagen, corresponderend met de dikte van de laag.

Tabel 3.1 Overzicht modelvarianten analyse diepe kwelonttrekkingen

	Aantal onttrekkingen	Totale debiet bij Q = 4 miljoen m <sup>3</sup> /jaar	Totale kwelflux (miljoen m <sup>3</sup> /jaar)
<b>Categorie 1: diepe polders met kwel</b>			
Horstermeer	4	16	17.8
Tempelpolder	1	4	3.9
Waverveen	3	12	12.3
Schermer	2	8	9.2
Wieringermeer	9	36	83.2
Purmer	3	12	12.4
Wijdewormer	2	8	9.8
Beemster	3	12	12.8
Koekoekspolder	4	16	17.7
Zuidplaspolder	2	8	7.7
Flevopolder	34	136	272.2
Noordoostpolder	21	84	139.9

Categorie 2: kwelgebieden langs hoger gelegen zandgronden			
Brabantse wal	2	8	-
Veluwe randmeerzone	9	36	-



Figuur 3.6 Locaties van winningen in de verschillende modelvarianten analyse diepe kwelonttrekkingen.

### 3.3.5 Analyse veenplassen

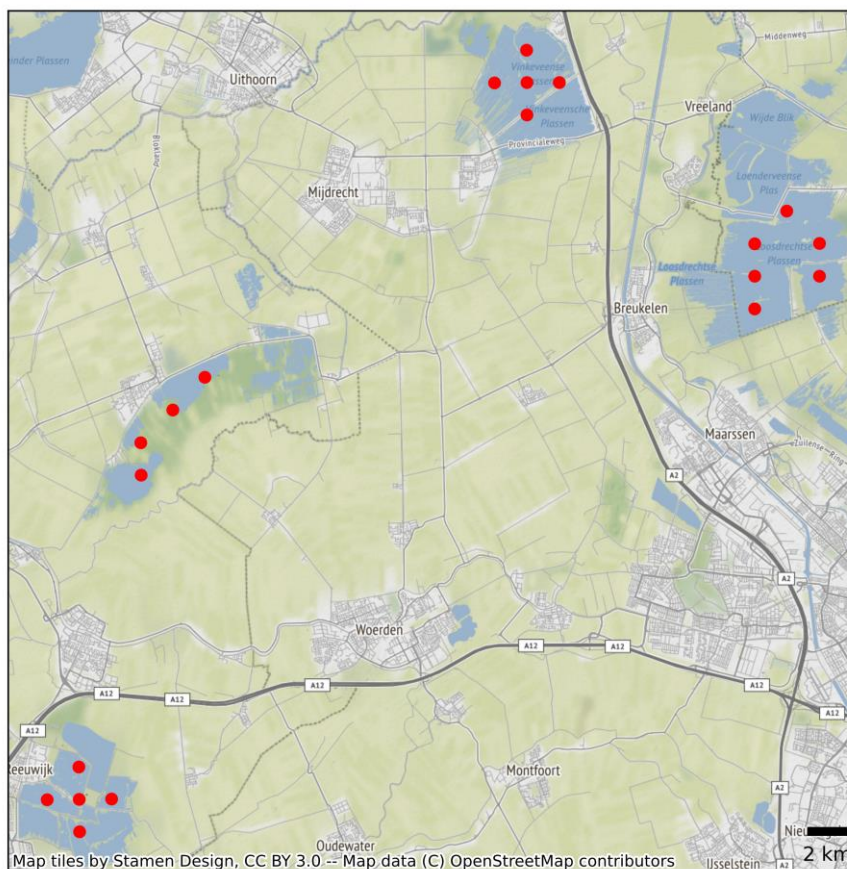
Om inzicht te verkrijgen in het winbare volume en de effecten van onttrekkingen onder veenplassen, zijn er op vier geselecteerde veenplassen verschillende onttrekkingsscenario's geëvalueerd, afhankelijk van de grootte van de plas. Net zoals bij de analyse van kwelonttrekkingen, zijn er twee scenario's doorgerekend:

- 1) Een scenario met onttrekkingsdebieten van 1 miljoen kubieke meter per jaar;
- 2) Een scenario met onttrekkingsdebieten van 4 miljoen kubieke meter per jaar.

Tabel 3.2 en figuur 3.7 geven het aantal onttrekkingen en locaties van de onttrekkingen weer. De effecten van deze onttrekkingen op grondwaterstanden, stijghoogten in diepere watervoerende pakketten, kwel- en wegzijgingsfluxen, en de verandering in de zoet-zout grondwaterverdeling zijn gekwantificeerd en geanalyseerd.

Tabel 3.2 Overzicht modelvarianten analyse veenplassen.

	Aantal onttrekkingen	Totale debiet (Q = 4 miljoen m <sup>3</sup> /jaar)
<b>Loosdrechtse plassen</b>	6	24
<b>Nieuwkoopse plassen</b>	4	16
<b>Reeuwijkse plassen</b>	5	20
<b>Vinkeveense plassen</b>	5	20



Figuur 3.7 Locaties van winningen in de verschillende modelvarianten analyse veenplassen.

## 3.4 Resultaten oppervlaktewaterwinningen

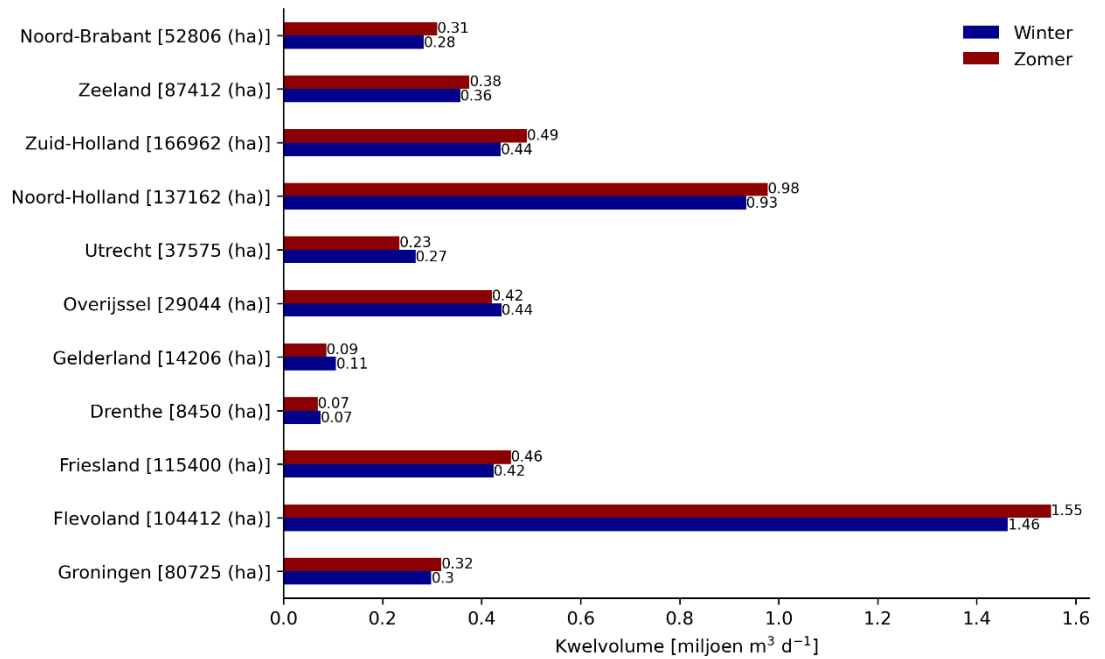
### 3.4.1 Totale kwelvolume in de kustvlakte

Het totale kwelvolume in laag-Nederland bedraagt ongeveer 1635 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (Tabel 3.3). Ca. 10% hiervan is dermate zout dat verdere verwerking tot drinkwater op dit moment niet kosten efficiënt is. Verder valt op dat het kwelvolume en de zoutwaterconcentratie sterk per provincie verschilt. Flevoland is de provincie met de meeste kwel, wat gezien de lage ligging van de provincie logisch is. In de kustprovincies Friesland, Noord-Holland en Zuid-Holland en de IJsseldelta in Overijssel komt relatief veel kwel voor. Bovendien is deze kwel grotendeels nog zoet of brak, waardoor het eventueel ingezet kan worden voor drinkwater. In Zeeland is de kwel daarentegen dermate zout, dat dit gebied weinig interessant maakt voor kwelwinning (zie Figuur 3.9). De overige provincies bevinden zich grotendeels buiten de kustvlakte en hebben daardoor per definitie lagere kwelcijfers. Bovendien is kwel in deze provincies voornamelijk sterk in beekdalén (zie Figuur 3.9), waar flora en fauna vaak ook sterk afhankelijk van de kwel is en grondwaterwinning hier niet realistisch is.

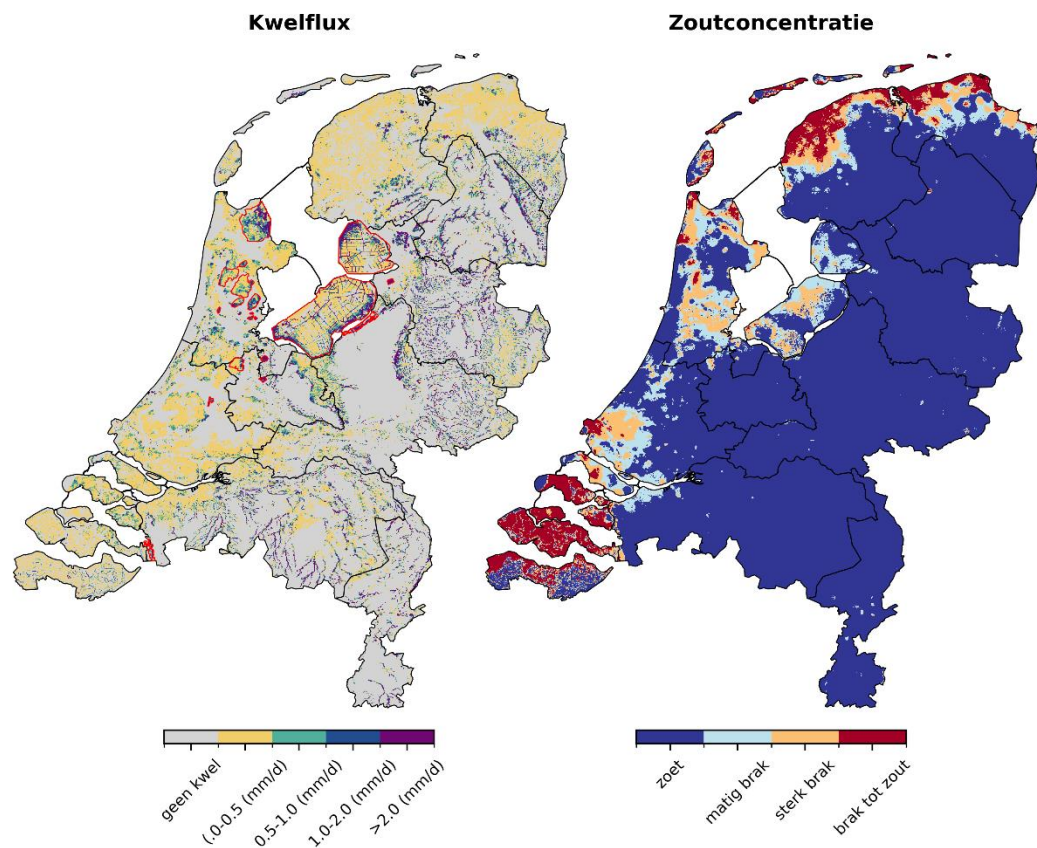
Figuur 3.8 laat de seizoensgebonden variatie zien in de grootte van de kwelflux voor de zomermaanden (juni, juli en augustus) en de wintermaanden (december, januari, februari). Het netto verschil is klein: het totale kwelvolume bedraagt in de wintermaanden gemiddeld 5.08 miljoen m<sup>3</sup> per dag en in de zomermaanden 5.29 miljoen m<sup>3</sup> per dag. Echter, analyse van de modelresultaten – buiten de scope van dit onderzoek – laat zien dat de dynamiek van de kwelflux sterk kan variëren per gebied en afhangt van het oppervlaktewaterbeheer en het type kwelgebied.

Tabel 3.3: Kenmerken kwel in laag-Nederland (kustvlakte gelegen onder 1 m NAP) uitgesplitst per provincie .

	Kwelvolume				Gemiddelde concentratie	Zoutvracht	Grootte kwelgebied	Areaal Provincie (< 1 m NAP)
	<150 mg Cl/L	>150 mg Cl/L	>1000 mg Cl/L	>5000 mg Cl/L				
	[miljoen m <sup>3</sup> jr <sup>-1</sup> ]	[miljoen m <sup>3</sup> jr <sup>-1</sup> ]	[miljoen m <sup>3</sup> jr <sup>-1</sup> ]	[miljoen m <sup>3</sup> jr <sup>-1</sup> ]				
	[g Cl-/L]	[miljoen kg jr <sup>-1</sup> ]	[km <sup>2</sup> ]	[km <sup>2</sup> ]				
<b>Groningen</b>	64,7	12,0	11,4	11,0	1,7	168,4	997,7	1835,3
<b>Flevoland</b>	195,2	131,2	78,6	6,3	0,6	268,9	1052,4	1465,6
<b>Friesland</b>	118,1	13,2	21,9	20,4	1,4	239,9	1433,3	3031,2
<b>Drenthe</b>	23,4	0,9	0,1	0,0	0,1	2,3	86,1	151,1
<b>Gelderland</b>	34,0	0,4	0,2	0,0	0,1	3,2	133,1	220,4
<b>Overijssel</b>	131,7	0,5	0,0	0,0	0,1	10,0	246,4	743,8
<b>Utrecht</b>	75,0	4,0	3,0	0,6	0,2	53,5	303,4	804,1
<b>Noord-Holland</b>	103,0	83,7	96,0	34,7	1,6	582,3	1372,4	2795,4
<b>Zuid-Holland</b>	83,5	44,9	23,0	5,4	0,8	132,8	1453,2	3026,9
<b>Zeeland</b>	8,5	9,5	23,5	73,9	8,5	996,9	937,4	1797,1
<b>Noord-Brabant</b>	79,2	7,1	1,6	0,1	0,1	13,1	519,6	875,8
<b>Totaal</b>	916,3 (56%)	307,4 (19%)	259,3 (16%)	152,4 (9%)		2471,3	8535,0	16746,7



Figuur 3.8: Gemiddeld kwelvolume per dag voor zomermaanden (juni t/m augustus) in rood, en wintermaanden (December t/m Februari) in blauw. (Voor gebied < 1 m NAP).



Figuur 3.9: Links) jaar representatieve kwelflux, in rood geselecteerde kansrijke kwelgebieden. Rechts) Zoutconcentratie van kwelflux.

In de regel lijken gebieden waar kwel vanuit hoger gelegen zandgronden wordt gevoed (in Utrecht, Gelderland en Overijssel) hogere stijghoogte te hebben in de winter, waardoor de kwelflux dan wat hoger is. Terwijl in diepe polders met vaak een relatief stabiele stijghoogte, de kwel in de zomer sterker is door lagere freatische grondwaterstanden als gevolg van toegenomen (gewas)verdamping.

In Figuur 3.9 geven de rood omcirkelde gebieden de geselecteerde kwelgebieden weer die voldoen aan de criteria die opgesteld in sectie 3.3.2. De kwelgebieden kunnen worden onderverdeeld in 2 categorieën:

- 1) Diepe polders: Noordoostpolder, Flevopolder, Noordmeer (ten noorden van Broek in Waterland), Broekermeer (ten westen van Broek in Waterland), Vrouwenverdriet (tussen Assendelft en Vrouwenverdriet), Wogmeer, Tempelpolder, Wijdewormer, Schermer, Waverveen (ten westen van Vinkeveense plassen), Purmer, Beemster, Koekoekspolder, Horstermeer, Bethunepolder en het Wieringermeer;
- 2) Kwelgebieden langs hoger gelegen zandgronden: zone ten westen van Brabantse wal (hierna Brabantse wal) en de zone tussen de Veluwe en het Veluwemeer (hierna Veluwemeer).

Tabel 3.4: kweleigenschappen geselecteerde kansrijke kwelgebieden

	Netto Kwelvolumen	Netto Kwelflux	Chloride-concentratie	Grootte Kwelgebied <sup>1</sup>	Grootte gebied
	[miljoen m <sup>3</sup> jr <sup>-1</sup> ]	[mm/d]	[mg Cl/L]	[km <sup>2</sup> ]	[km <sup>2</sup> ]
<b>Categorie 1: diepe polders met kwel</b>					
Beemster	12,8	0,5	695	70,4	70,6
Belmermeer	1,4	2,9	1930	1,4	1,4
Bethunepolder	21,7	11,1	22	5,9	5,4
Broekermeer	2,2	1,9	1265	3,2	3,2
Flevopolder	243,3	0,7	849	704,3	973,0
Horstermeer	17,8	7,0	317	7,5	7,0
Koekoekspolder	17,7	8,4	84	6,3	5,8
Noordmeer	1,4	2,9	618	1,3	1,3
Noordoostpolder	123,3	0,7	270	348,3	477,4
Purmer	12,3	1,2	1025	27,4	27,5
Schermer	9,0	0,5	3287	46,2	48,1
Tempelpolder	3,9	2,0	313	5,8	5,3
Vrouwenverdriet	2,4	2,2	1733	3,9	2,9
Waverveen	12,2	1,2	3906	30,1	29,0
Wieringermeer	81,5	1,1	2830	181,5	198,4
Wijdewormer	9,8	1,6	2908	16,6	16,4
Wogmeer	2,5	1,0	83	7,8	6,9
<b>Categorie 2: kwelgebieden langs hoger gelegen zandgronden</b>					
Brabantse wal	7,2	1,2	730,6	15,9	16,3
Veluwemeer	32,1	2,6	75,3	25,8	33,6

<sup>1</sup> Dit betreft het areaal van het kwelgebied in het model, dit wijkt voor kleine gebieden soms af van het daadwerkelijk areaal.

Tabel 3.4 toont de kwelstatistieken per geselecteerd gebied. De verschillen per kwelgebied zijn groot: een aantal gebieden (Bethunepolder, Koekoekspolder, Horstermeer) vallen op vanwege de extreem grootte kwelflux, maar door de beperkte omvang van deze polders is het totale kwelvolume toch kleiner dan de veel grotere kwelgebieden zoals de Noordoostpolder en Wieringermeer. De gemiddelde chlorideconcentratie verschilt sterk, maar bevindt zich voor alle gebieden nog binnen de limiet om kostenefficiënt te kunnen verwerken tot drinkwater. De polders Bethunepolder, Koekoekspolder en Wogmeer hebben gemiddelde chloridegehalten beneden de drinkwaterlimiet van 150 mg/l.

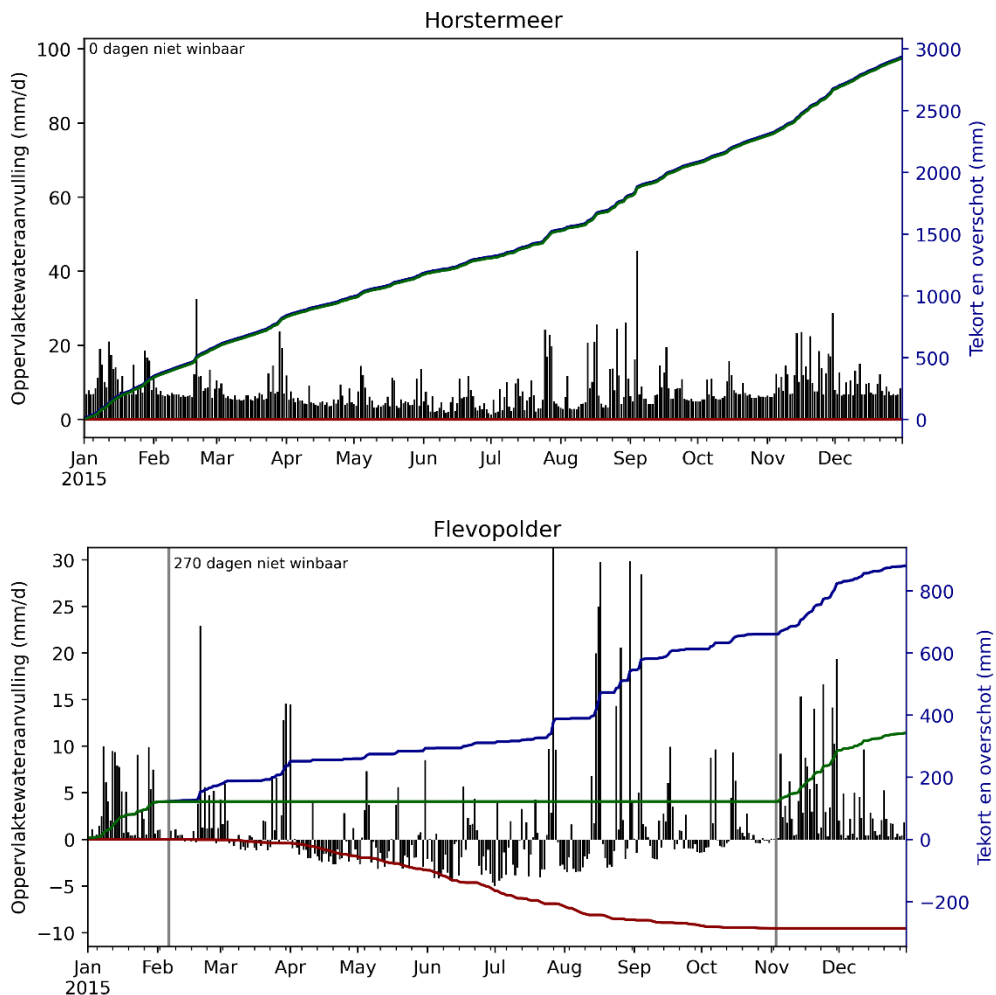
### 3.4.2 Winbaarheid kwel

Ondanks dat er in veel van de geselecteerde kwelpolders sprake is van een netto kwelflux jaarrond, hangt het uiteindelijk van de lokale oppervlaktewaterbalans af of er ook jaarrond een oppervlaktewaterwinning plaats kan vinden. Om dit te illustreren is een sterk vereenvoudigde waterbalans weergegeven voor polder Beemster en Horstermeer (Figuur 3.10). De waterbalans is opgesteld voor het jaar 2015, dat voor West-Nederland als redelijk gemiddeld jaar geldt met betrekking tot neerslag en verdamping. De zwarte balkjes geven de netto oppervlaktewateraanvulling per dag weer, dat bestaat uit de netto aanvulling door kwel en wegzijging (jaarrond constant aangenomen) en neerslag en verdamping (op dag basis).

Aangezien er in de polders wordt gestuurd op een stabiel oppervlaktewaterpeil, moet overtollig water worden afgevoerd om te hoge peilen te voorkomen en water worden afgevoerd als er een tekort dreigt om zo lage peilen te voorkomen. Het overschot (kwel + neerslag) kan worden benut voor een waterwinning, maar bij een tekort moet er water worden aangevoerd en moet de winning worden onderbroken. Voor een interessante oppervlakte waterwinning moet er dus eigenlijk jaarrond sprake zijn van een wateroverschot. In deze studie verder niet beschouwd maar combinaties tussen oppervlaktewaterwinning in de winter en onttrekkingen in de zomer kunnen interessant zijn.

Voor polder Horstermeer is er jaarrond sprake van een positieve aanvulling (kwel is altijd groter dan verdamping), waardoor er geen tekort ontstaat en het overschot van 3000 mm kan worden ingezet voor een waterwinning. Voor de Flevopolder is echter van februari t/m november regelmatig sprake van een negatieve aanvulling (verdamping is groter dan aanvulling door kwel) aangegeven door de rode lijn in Figuur 3.10, waardoor in deze periode een oppervlaktewaterwinning niet aantrekkelijk is. Er blijft dus maar een korte periode over dat er consistent sprake is van netto aanvulling, waardoor het winbaar overschot aan het eind van het jaar slechts 370 mm betreft.



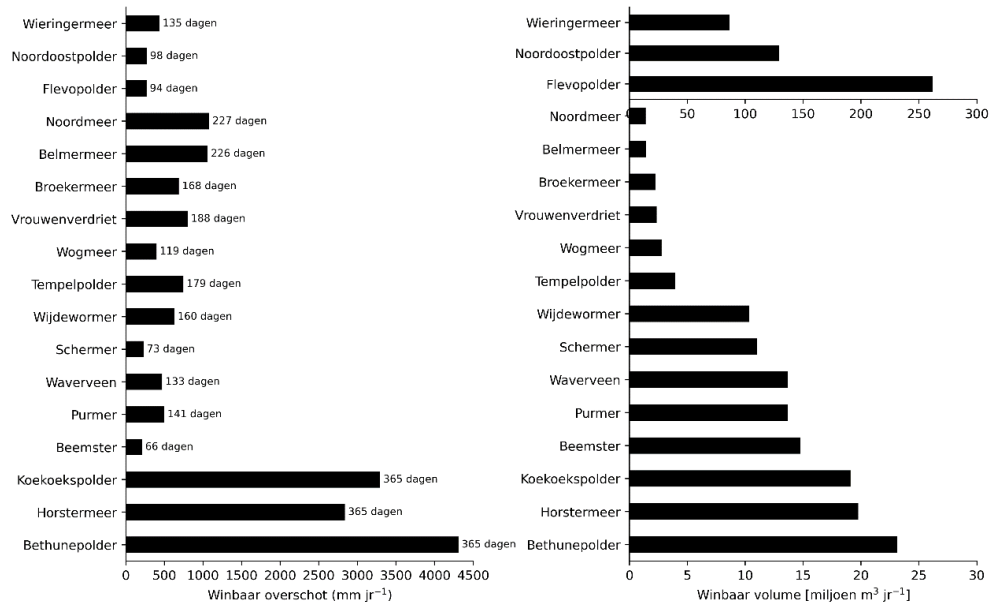


Figuur 3.10: oppervlaktewaterbalans van Horstermeer en Flevopolder. Zwarte balken zijn de netto aanvulling door neerslag en verdamping per dag, in rood het doorlopend tekort, in blauw het doorlopend overschot, in groen het doorlopend winbaar overschot.

Deze waterbalans is opgesteld voor alle geselecteerde diepe kwelpolders voor de periode van 2010 t/m 2019. Figuur 3.11 toont in de eerste kolom het gemiddelde winbare overschot per jaar gedurende de periode 2010-2019 en het aantal dagen waarop er ononderbroken gewonnen kan worden. In de tweede kolom wordt het winbaar volume per polder getoond (dit is het winbaar overschot vermenigvuldigd met het areaal polder). Dit toont dat alleen in de grotendeels al bekende polders Koekoekspolder, Horstermeer en Bethunepolder jaarrond een oppervlaktewaterwinning interessant is die ieder een winbaar volume van rond de 20 miljoen m<sup>3</sup> per jaar kunnen leveren.

In een aantal polders zoals polder Noordmeer en Belmermeer, is het gedurende een groot deel van het jaar nog steeds mogelijk om ononderbroken water te winnen. Echter, tijdens de zomermaanden, wanneer verdamping en transpiratie het hoogst zijn, is dit niet meer mogelijk. De vraag is of het realistisch is om hier een winning te starten. Eventueel is een combinatie met een grondwateronttrekking tijdens de zomermaanden een interessante optie om verder te onderzoeken.

Het totale winbare volume van kwel en neerslagoverschot bedraagt in deze gebieden 617 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, maar slechts 59 miljoen m<sup>3</sup> hiervan kan in deze diepe polders jaarrond via een oppervlaktewaterwinning gewonnen worden.



Figuur 3.11: links) winbaar overschot in (mm/jr) inclusief het aantal dagen per jaar dat bijdraagt aan dit overschot. Rechts) winbaar volume in (miljoen m<sup>3</sup> per jaar) per polder. Dit wordt berekend door het winbaar overschot te vermenigvuldigen met de totale oppervlakte van de polder.

## 3.5 Resultaten grondwateronttrekkingen in kwelgebieden

In deze paragraaf worden de modelberekeningen van grondwateronttrekkingen in diepe polders, onder de veenplassen en aan de voet van de Veluwe en Brabantse Wal besproken. Het gaat er bij deze analyse vooral om wat de effecten op de omgeving zijn, waarbij wordt gekeken naar effecten op grondwaterstanden, stijghoogtes, kwel- en infiltratieflux, zoutvrachten, zoetzout-verdeling ondergrond, zoutconcentratie van het pompwater. Deze effecten vormen een belangrijk fysisch gegeven om de potentie van aanvullende winningen nader te verkennen.

Nogmaals, het blijven modelberekeningen op een nationaal schaalniveau met onder andere onzekerheden in de opbouw en zoutverdeling van de ondergrond, waarbij de resultaten voornamelijk als indicatief dienen te worden geïnterpreteerd.

### 3.5.1 Diepe polders

#### *Grondwaterstanden en stijghoogtes*

Het onttrekken van (kwellend) grondwater zorgt voor een daling van ondiepe grondwaterstanden en stijghoogtes in diepere watervoerende pakketten (Figuur 3.12).

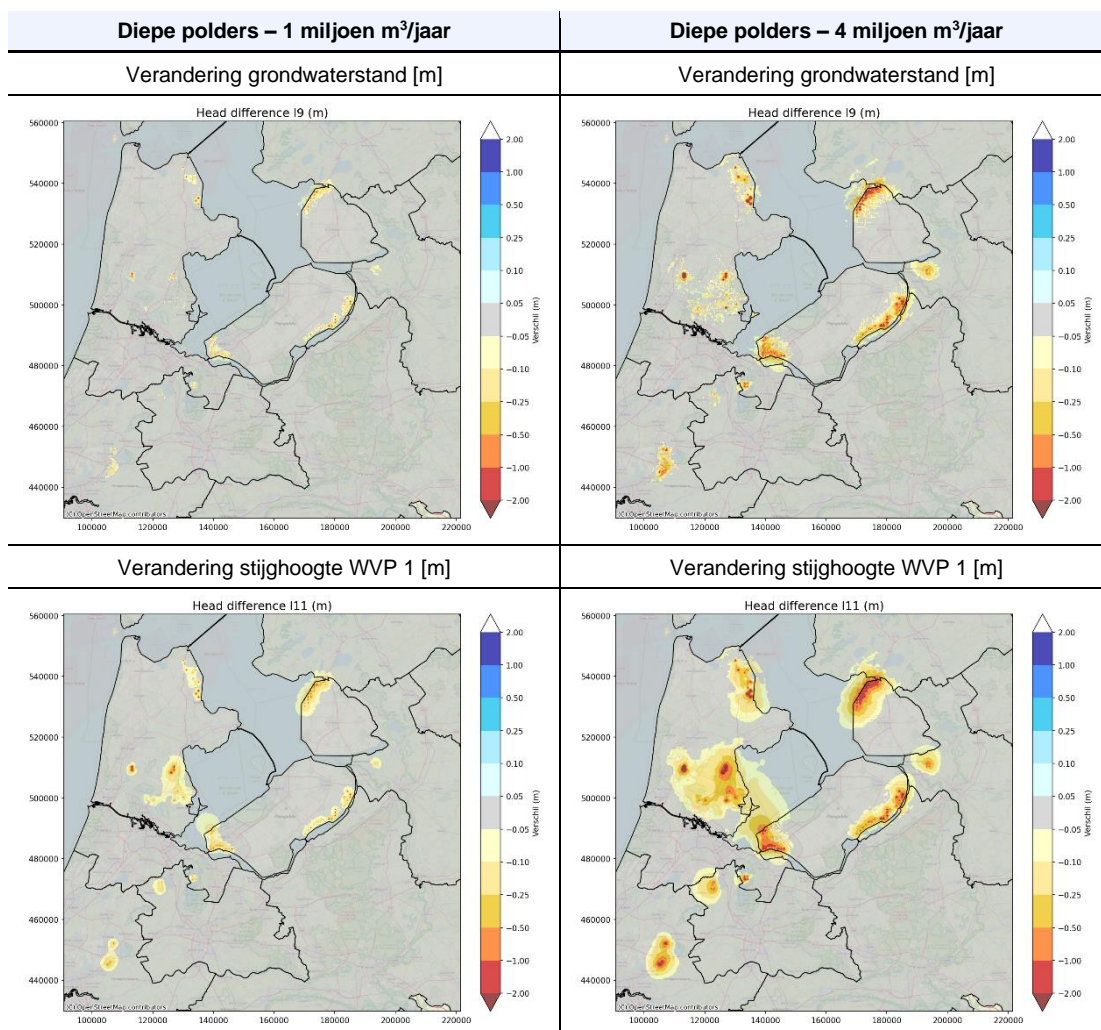
De stijghoogtedaling bij de onttrekkingen van 1 en 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar is groter dan het effect (zowel absoluut als de uitstraling) op de freatische grondwaterstand. Dit komt omdat het grondwater onder de weerstandsbiedende deklaag uit het eerste watervoerend pakket wordt onttrokken en dat effect vandaar uit doorwerkt naar het ondiep, freatische systeem. De effecten op de freatische grondwaterstand zijn veel kleiner omdat ze voor een groot deel worden gecompenseerd door het oppervlaktewatersysteem dat sterk gereguleerd wordt door het beheerd polderpeil.

De stijghoogtedaling en het gebied waar de stijghoogte daalt (invloedgebied, onttrekkingskegel) is onder andere afhankelijk van de weerstand van de deklaag. De hoeveelheid onttrokken grondwater uit het eerste watervoerend pakket dient te worden aangevuld vanuit het ondiepe systeem. Bij een hoge weerstand is een grotere stijghoogtedaling voor een groter gebied nodig om dit volume vanuit het freatisch systeem door de deklaag naar het watervoerend pakket waaruit onttrokken te laten stromen.

Het is duidelijk zichtbaar dat de 4 miljoen m<sup>3</sup> onttrekkingen een veel groter effect hebben dan die van 1 miljoen m<sup>3</sup>. Bij de grote onttrekkingen van 4 miljoen m<sup>3</sup> is te zien dat het invloedgebied van de stijghoogte van verschillende winningen in west-Nederland elkaar raken. Over een groot gebied vindt er een stijghoogtedaling plaats en voor dit gebied worden de kwel en infiltratieprocessen significant beïnvloed (zie onder).

Bij de onttrekkingen met een debiet van 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar worden de freatische grondwaterstanden ook veel sterker beïnvloed. Dit is te zien aan de grotere invloedssfeer rondom de onttrekkingslocaties vandaan. De onttrekkingen met een debiet van 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar hebben duidelijk een veel beperkter effect op de freatische grondwaterstanden. In de buurt van de onttrekkingslocaties zelf zakken grondwaterstanden meer dan 2 meter.

De effecten op de grondwaterstand en freatische grondwaterstand worden in Figuur 3.12 getoond voor de situatie na 50 jaar, maar er dient te worden opgemerkt dat deze effecten al binnen enkele jaren na de start van de onttrekkingen maximaal zijn. Veranderingen van de zoetzoutverdeling blijven doorgaan (zie onder) maar hebben maar een heel klein effect op de veranderingen van de stijghoogte en grondwaterstand.



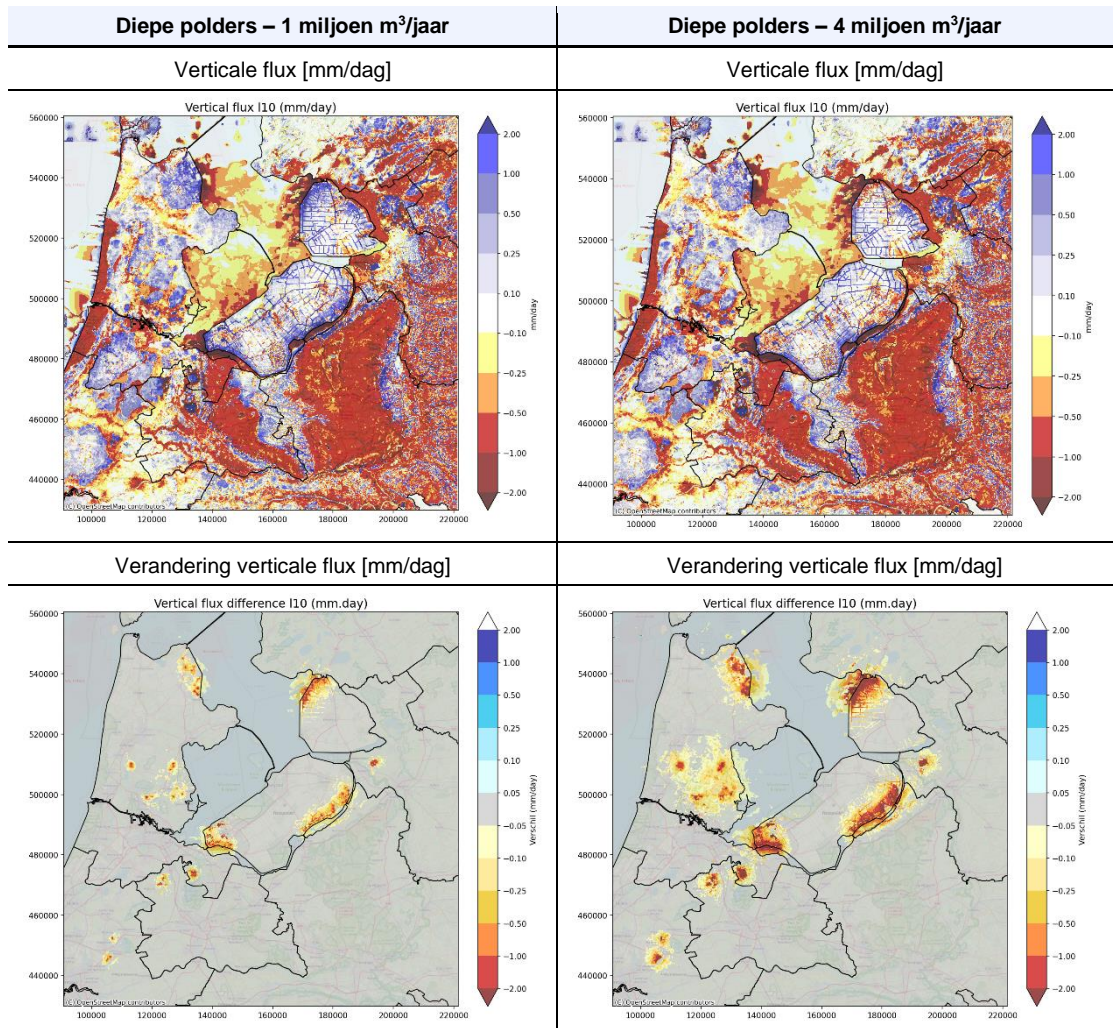
Figuur 3.12 Effect van grondwaterwinningen onder diepe polders op de freatische grondwaterstand [m] (boven) en de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket [m] (onder), na 50 jaar grondwater onttrekken.

### Kwelflux en zoutvracht

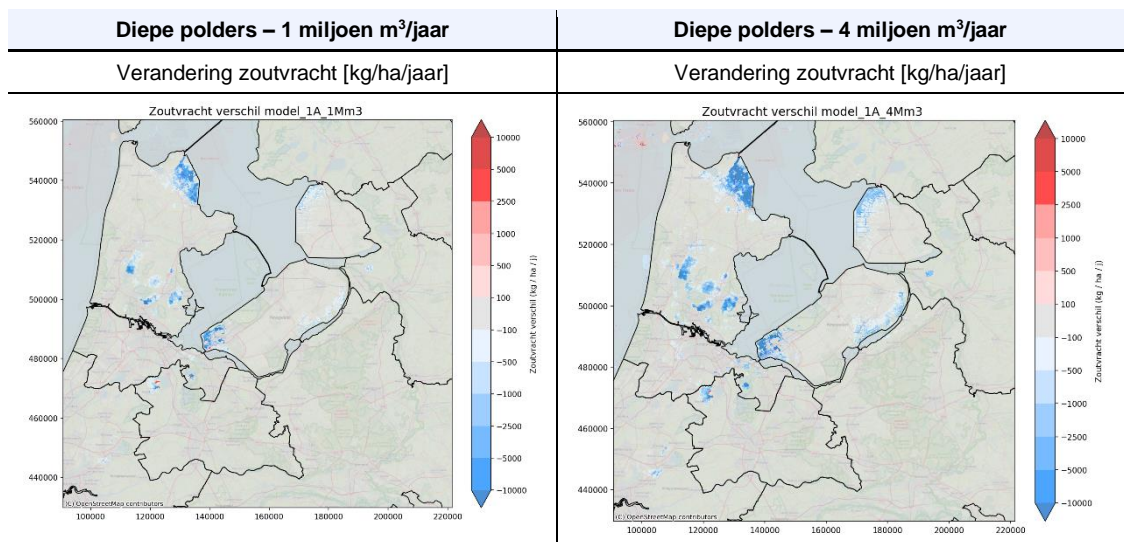
De stijghoogtedaling als gevolg van de onttrekkingen leidt tot minder kwel in de kwelgebieden en meer infiltratie in de infiltratiegebieden. Het ruimtelijk effect op de kwel en infiltratieflux staat weergegeven in Figuur 3.13 waarbij de geel en oranje tinten een afname van de kwel dan wel een toename van de infiltratie weergegeven.

Voor de zoute kwelpolders kan dit als een positief effect worden gezien omdat hierdoor minder zoute kwel in de polder optreedt en daardoor de zoutvracht naar het oppervlaktewater afneemt. Dit is ook het principe dat Waternet met de beoogde onttrekkingen in de Horstermeerpolder nastreeft (Figuur 3.14). In de kwelpolders met een hoge zoutvracht zijn zoutconcentraties van het oppervlaktewater vaak hoog en moet zoetwater worden aangevoerd om sloten door te spoelen. Wanneer de zoutvracht naar de sloten afneemt is er dus minder zoetwater nodig voor doorspoeling.

De onttrekkingen in de kwelpolders hebben ook stijghoogtedalingen tot buiten de kwelpolders tot gevolg. Dit zijn veelal hoger gelegen polders waar infiltratie van ondiep grondwater naar het eerste watervoerende pakket optreedt. In deze infiltratiegebieden neemt de infiltratie toe als gevolg van de onttrekkingen. Voor de winterperiode kan dit als een positief effect worden beschouwd omdat er dan minder water hoeft worden uitgemaal in de omringende polders. Maar voor de zomerperiode is de extra infiltratie nadelig omdat de watervraag dan toeneemt en dus extra wateraanvoer nodig is om de peilen in deze polders te kunnen handhaven.



Figuur 3.13 Effect van grondwaterwinningen onder diepe polders op de verticale flux (mm/dag) tussen het eerste watervoerend pakket en het freatisch watersysteem, na 50 jaar grondwater onttrekken. Gele kleuren tonen een toename in neerwaartse flux (infiltratie) of afname in opwaartse flux (kwel) en blauwe kleuren tonen het tegenovergestelde.



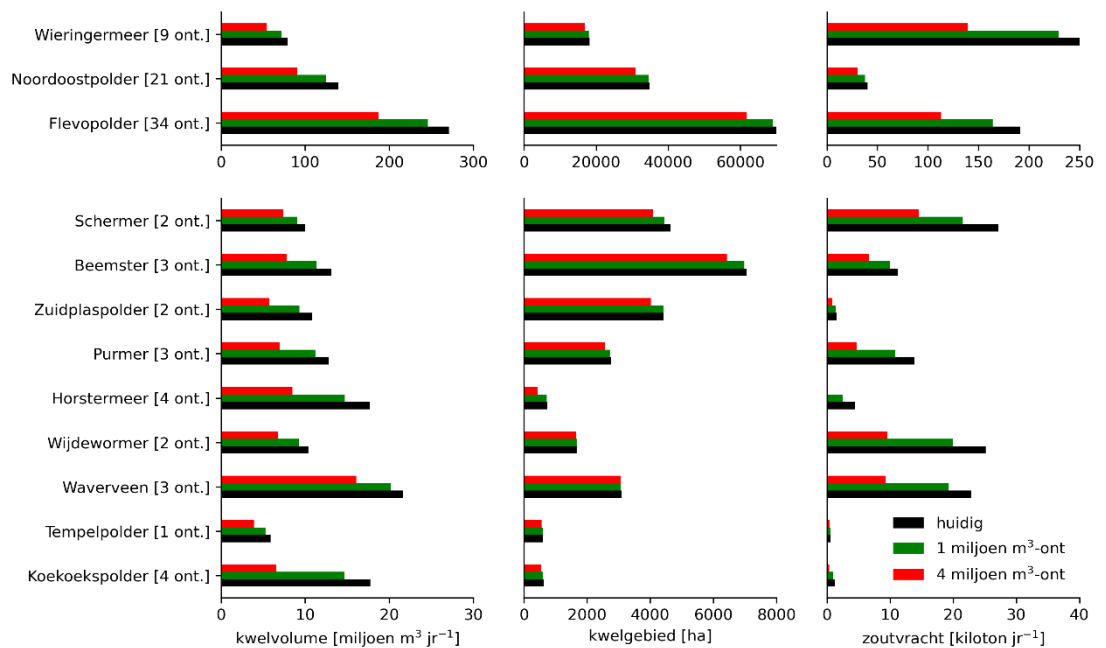
Figuur 3.14 Effect van grondwaterwinningen onder diepe polders op de zoutvracht (kg/ha/jaar), na 50 jaar grondwater onttrekken.

Het effect van grondwateronttrekkingen op de kwelflux en zoutvracht is per diepe polder samengevat in Figuur 3.15 en Tabel 3.5 waardoor de verschillen tussen de polders zichtbaar worden.

Bij onttrekkingen van 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar neemt het oorspronkelijk kwelvolume tussen de 7% en 17% af. De reductie van de kwelflux wordt tussen de 45% en 75% afgevangen door het onttrekkingsdebiet. Hoe hoger dit percentage hoe minder water er via infiltratie van het oppervlaktewater of diep grondwater uit de omgeving wordt onttrokken. Bij onttrekkingen van 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar neemt het oorspronkelijk kwelvolume veel meer af en wel tussen de 26% en 63%. De verlaging in kwelflux wordt tussen de 33% en 69% afgevangen door het onttrekkingsdebiet, het overige is dus vooral een toename van de infiltratie in het omliggende gebied.

De onttrekkingen in de polders Horstermeer en Koekoekspolders zijn het effectiefst in het afvangen van kwel met meer dan 17% bij onttrekkingen van 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar en meer dan 50% bij onttrekkingen van 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Andere polders waar effectief kwel kan worden afgevangen zijn de Wieringermeer, Zuidplaspolder, Flevopolder en Noordoostpolder. Hier is het grootste deel van het onttrokken water afkomstig van kwel.

Polders waar relatief gezien minder kwelwater wordt afgevangen ten opzichte van het onttrekkingsdebiet, kunnen wel een grote daling in zoutvracht ervaren. Dit geldt bijvoorbeeld voor de polders Schermer en Waverveen.



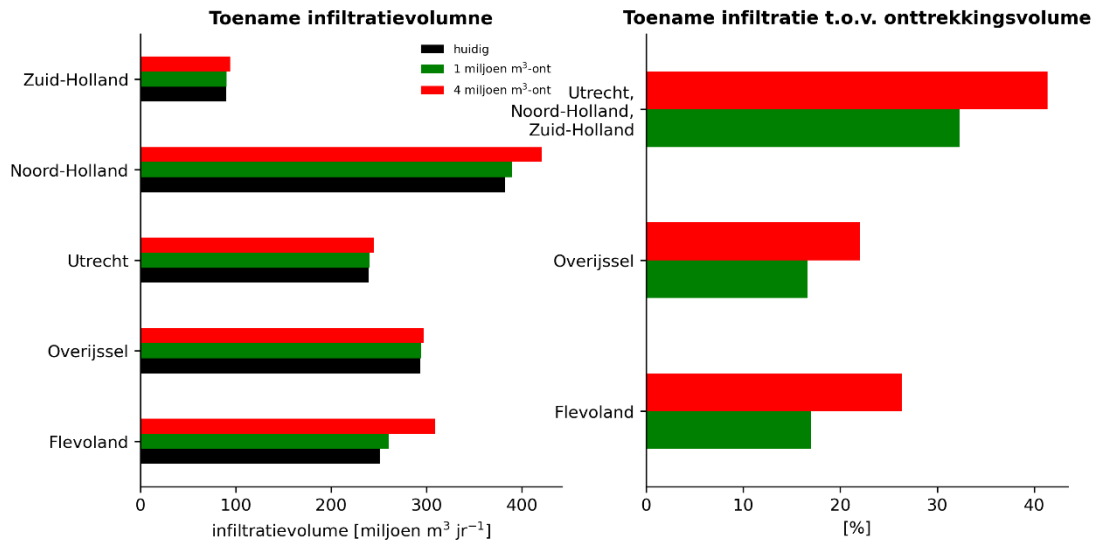
Figuur 3.15 Volume kwelwater [miljoen m<sup>3</sup>/jaar], areaal kwelgebied [ha] en zoutvracht [kiloton/jaar] voor 12 polders waar onttrekkingen zijn geplaatst.

Tabel 3.5 Totale kwelflux (miljoen m<sup>3</sup>/jaar) in diepe polders.

	Huidig	Bij onttrekkingen van 1 miljoen m <sup>3</sup> /jaar			Bij onttrekkingen van 4 miljoen m <sup>3</sup> /jaar		
	Kwelflux miljoen [m <sup>3</sup> /jaar]	Kwelflux miljoen m <sup>3</sup> /jaar]	Afname kwelflux t.o.v. Huidig	Afname kwelflux t.o.v. onttrekkingsdebiet	Kwelflux miljoen m <sup>3</sup> /jaar]	Afname kwelflux t.o.v. Huidig	Afname kwelflux t.o.v. onttrekkingsdebiet
<b>Horstermeer</b>	17.7	14.7	-17%	75%	8.5	-52%	58%
<b>Tempelpolder</b>	5.9	5.3	-10%	60%	3.9	-34%	50%
<b>Waverveen</b>	21.6	20.2	-7%	47%	16.1	-26%	46%
<b>Schermer</b>	10	9.1	-9%	45%	7.4	-26%	33%
<b>Wieringermeer</b>	79.1	72.3	-9%	76%	54.7	-31%	68%
<b>Purmer</b>	12.8	11.2	-13%	53%	7	-46%	48%
<b>Wijdewormer</b>	10.4	9.3	-10%	55%	6.8	-34%	45%
<b>Beemster</b>	13.1	11.4	-13%	57%	7.8	-41%	44%
<b>Koekoekspolder</b>	17.7	14.7	-17%	75%	6.6	-63%	69%
<b>Zuidplaspolder</b>	10.8	9.3	-14%	75%	5.7	-47%	64%
<b>Flevopolder</b>	270.7	245.8	-9%	73%	187.5	-31%	61%
<b>Noordoostpolder</b>	139.3	124.6	-11%	70%	90.4	-35%	58%

#### *Toename infiltratie in omliggende gebieden*

Zoals hierboven is besproken leiden onttrekkingen in de kwelgebieden tot minder kwel in deze kwelgebieden en tot meer infiltratie in de omliggende infiltratiegebieden. Dit kan voor de omliggende polders met name voor de zomerperiode tot een toename van de watervraag leiden om het gewenste polderpeil te kunnen handhaven. Om inzichtelijk te maken in hoeverre infiltratie van het ondiepe systeem naar het eerste watervoerende pakket optreedt en wat de toename is als gevolg van de onttrekkingen, is op provincieniveau het infiltratievolume bepaald voor de huidige situatie en voor de situatie met grote en kleine onttrekkingen. Hierbij is alleen gekeken naar gebieden rondom de kwelgebieden waaruit onttrokken wordt.

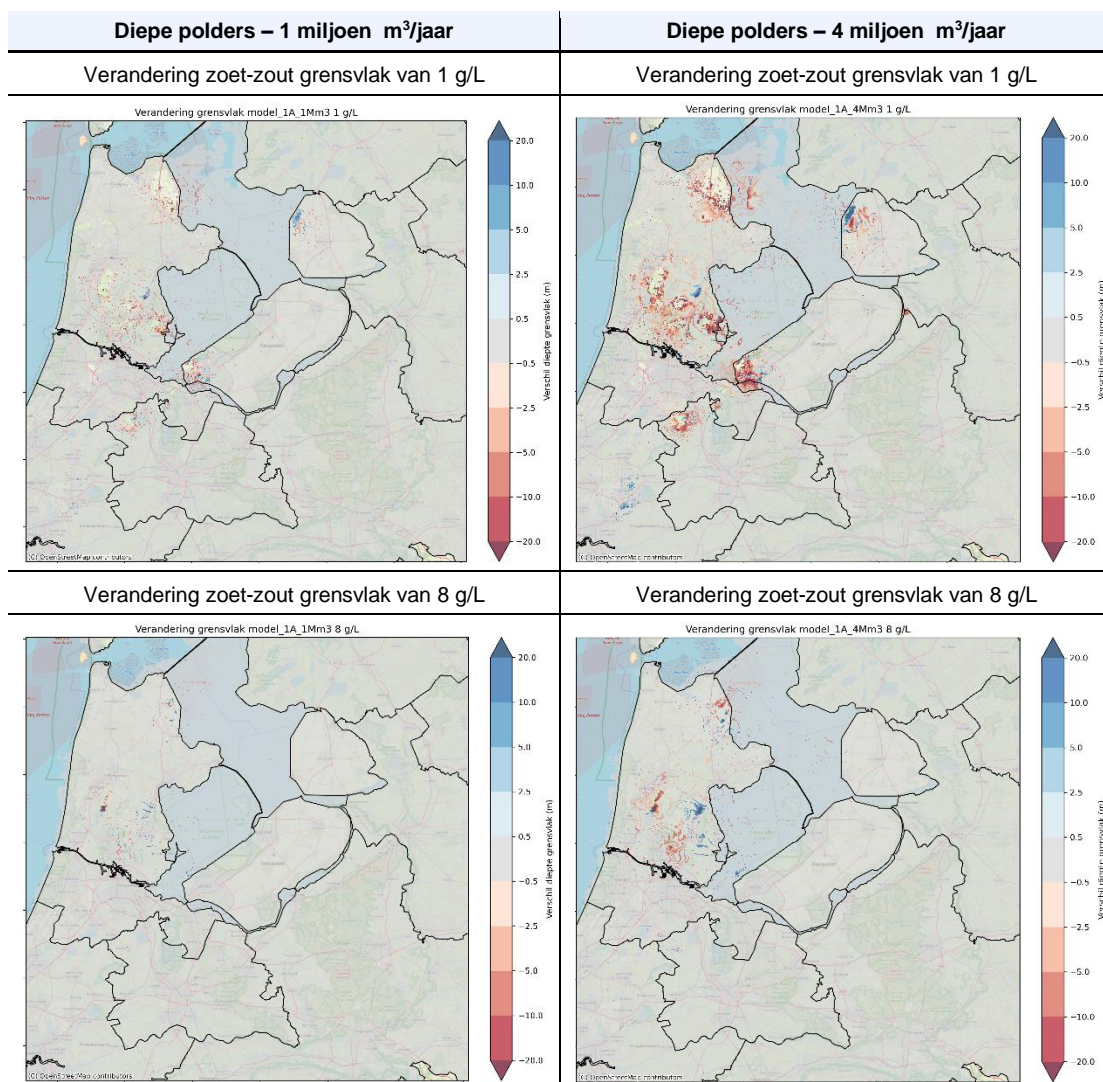


Figuur 3.16 (links) Infiltratievolume in (miljoen m<sup>3</sup>/jaar) in omliggende gebieden rondom diepe polders op provincieniveau, voor de situatie zonder onttrekkingen (zwart), met 1 miljoen m<sup>3</sup> onttrekkingen (groen) en met 4 miljoen m<sup>3</sup> onttrekkingen (rood). (rechts) Toename infiltratie t.o.v. het totale onttrekkingsvolume per provincie.

#### Zoet-zout verdeling en onttrekkingswater

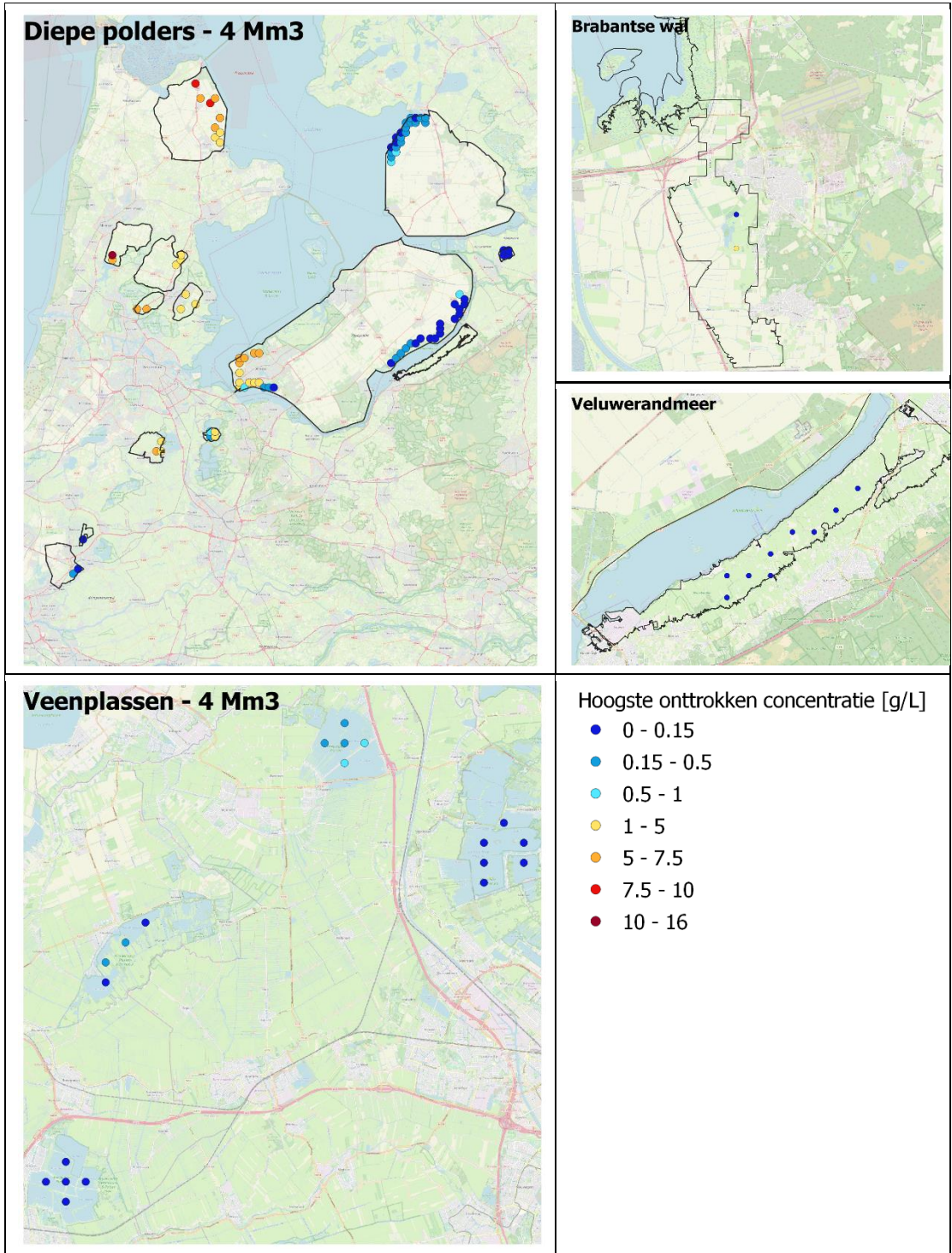
De veranderingen in stromingspatronen als gevolg van de onttrekkingen zorgen ervoor dat ook de zoet-zout verdeling van het grondwater verandert. De effecten van de grondwateronttrekkingen op de zoet-zoutverdeling zijn ruimtelijk heel verschillend, maar centreren zich in de buurt van de diepe polders (Figuur 3.17). In het algemeen kan gezegd worden dat de grondwateronttrekkingen ervoor zorgen dat het zoet-zout grensvlak van 1 g/L Cl in veel gebieden een aantal meter zakt. Hier lijkt dus verzoeting op te treden en dit is waarschijnlijk het geval door de toename van de infiltratie van omringende polders. De effecten zijn groter bij een groter onttrekkingsdebiet. Het grensvlak van 8 g/L verandert minder dan het grensvlak van 1 g/L. In de Beemster, Purmer en Wieringermeerpolder is een stijging van het zoet-zout grensvlak van 8 g/L te zien. Dit duidt op opkegeling, waarbij zout grondwater van grotere diepte wordt aangetrokken.



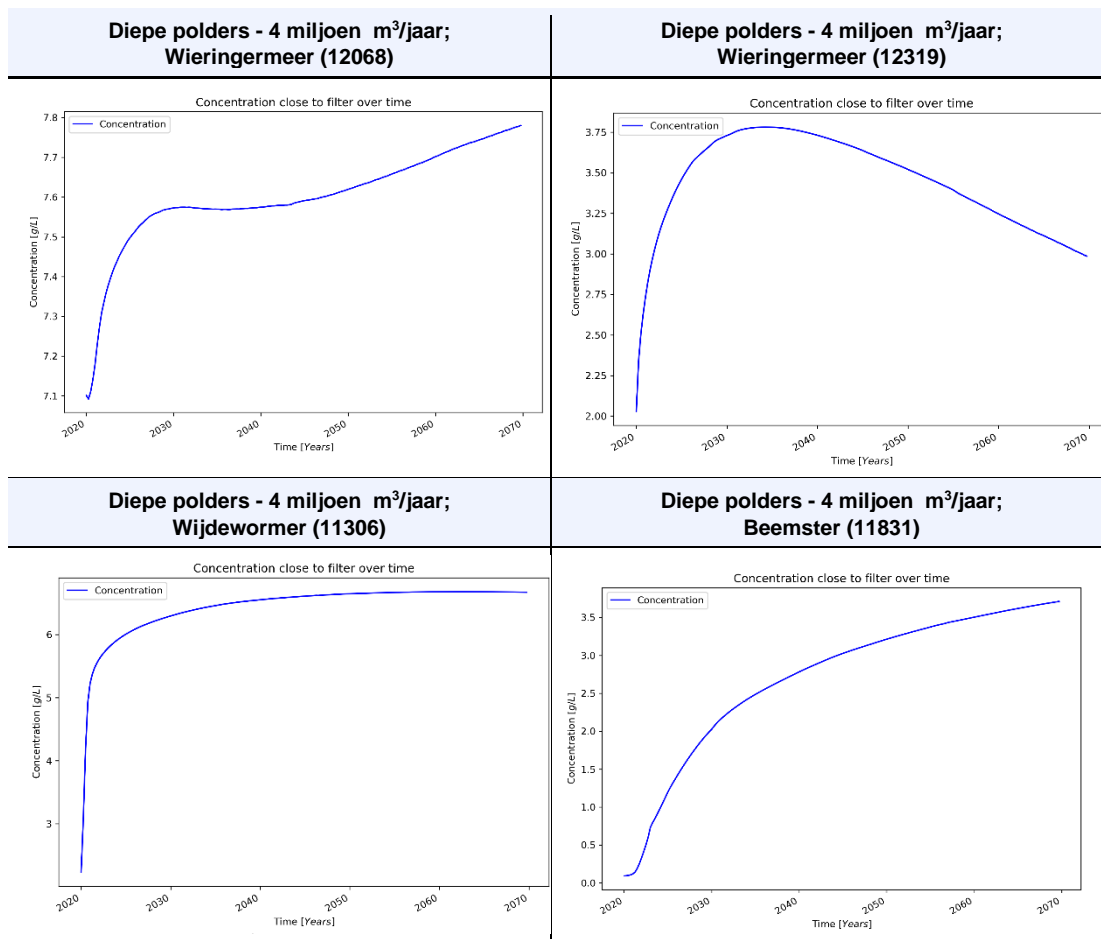


*Figuur 3.17 Verandering in het zoet-zout grensvlak van 1 g/L ten opzichte van huidige situatie (boven) en 8 g/L (onder), na 50 jaar grondwater onttrekken onder diepe polders. Blauwe kleuren tonen een daling van het zoet-zout grensvlak en rode kleuren een stijging.*

Wanneer de zoutconcentratie in het onttrekkingswater boven de limiet van 5 g/L komt (zie paragraaf 3.2.1) is het niet langer geschikt voor brakwaterwinning. Een aantal winningen in de Wieringermeer, Schermer, Wijdewormer en Waverveen polders onttrekken water dat boven de limiet van 5 g/L uitkomt (Figuur 3.18). Het verschil tussen de kleine en grote onttrekkingen is niet groot (zie bijlage D). In het noorden van de Wieringermeer en Schermer was de concentratie van het onttrokken water vanaf het begin al hoger dan 5 g/L (Figuur 3.18). In de Wijdewormerpolder heeft het onttrekkingswater in het begin de limiet van 5 g/L nog niet gehaald. Echter, na een aantal jaar stijgt de concentratie van het onttrekkingswater naar 6.5 g/L waarna het stagneert. In de Beemster was het onttrokken water in het begin zoet (<150 mg/L), maar na verloop van tijd neemt de concentratie van het onttrokken water gestaag toe, wat in de toekomst tot verdere problemen kan zorgen.



Figuur 3.18 Maximale concentratie van onttrokken water [g/L]



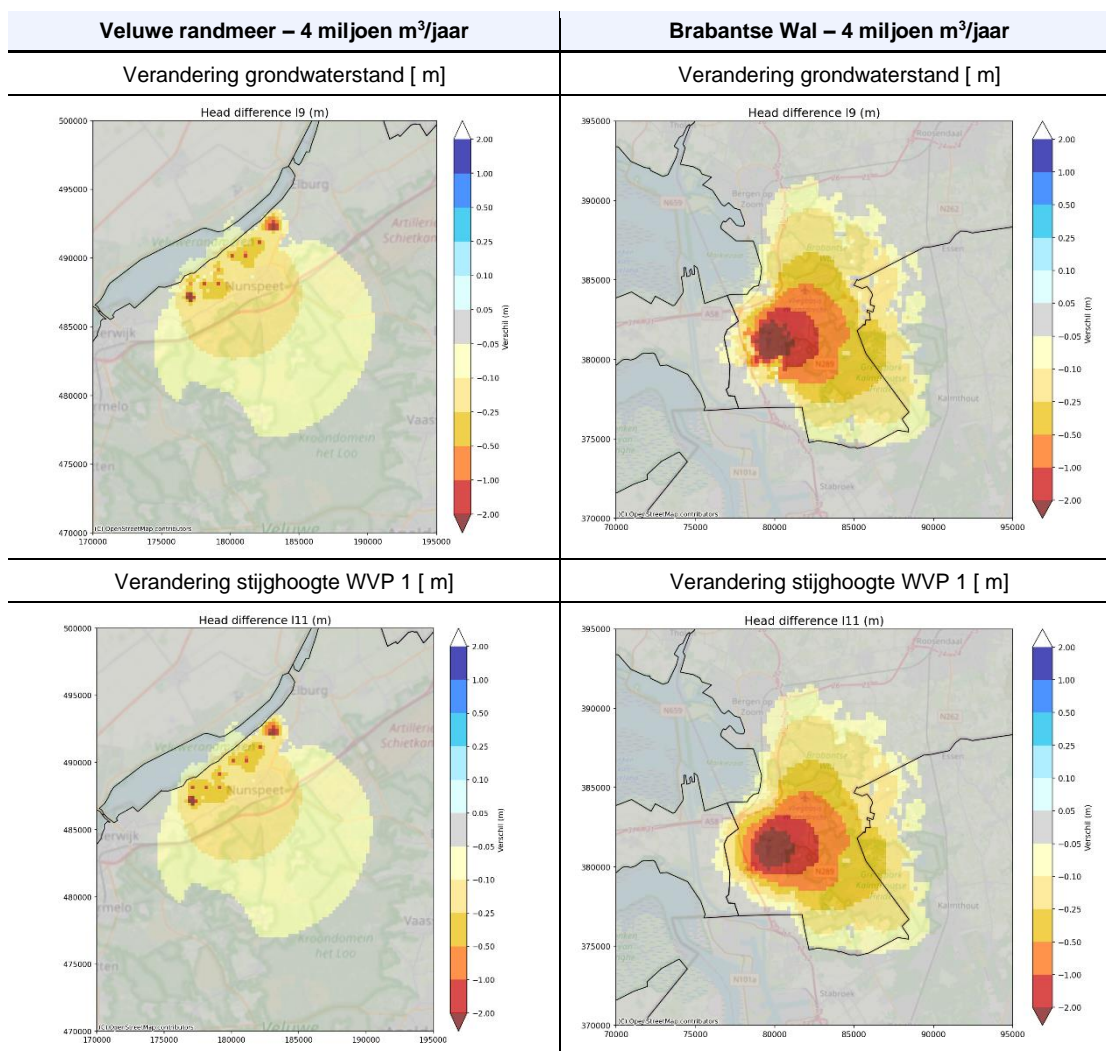
Figuur 3.19 Zoutconcentratie [g/L] nabij filter voor 4 onttrekkingslocaties, over tijd (50 jaar).

### 3.5.2 Kwelgebieden aangrenzend aan hogere zandgebieden: Veluwe en Brabantse Wal

De effecten op de stijghoogte en de grondwaterstand aan de voet van de Veluwe blijven redelijk beperkt ondanks de grote hoeveelheid van 36 miljoen m<sup>3</sup> dat er wordt onttrokken. Alleen lokaal ter hoogte van de onttrekkingsputten treden flinke dalingen op. De uitstraling van effecten groter dan 5 cm bereikt wel een groot gebied (10-15 km) en vooral richting de Veluwe waar de grondwaterstand al redelijk diep staat.

Grote dalingen van de stijghoogte of grondwaterstand blijven beperkt tot een relatief klein gebied omdat de effecten worden gecompenseerd door een afname van kwel en afvoer. Er vindt een flinke grondwaterstroming vanaf de Veluwe richting het randmeer met een grote hydraulische gradiënt waardoor effecten van onttrekkingen minder groot zijn.

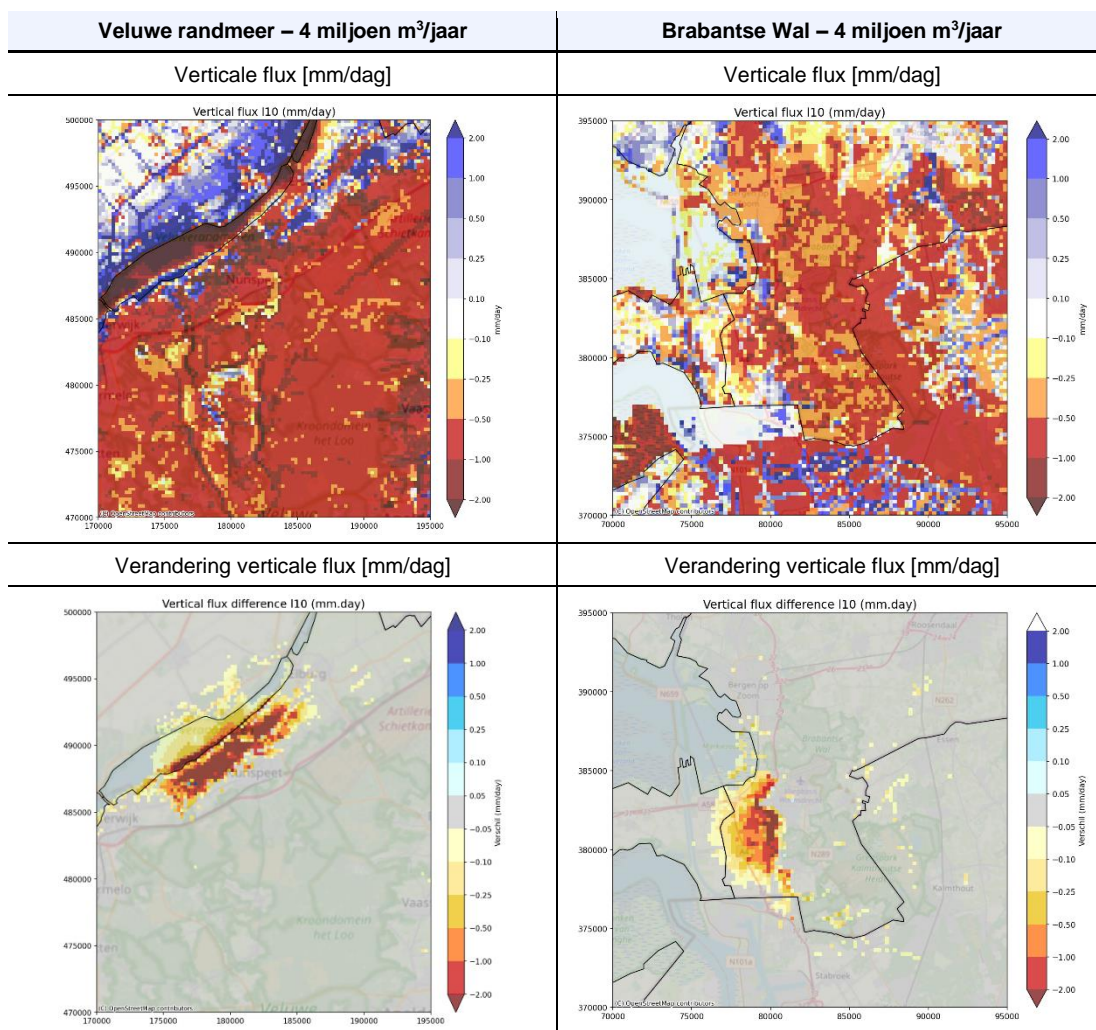
De effecten op de kwelflux zijn groot. Voor het gebied waar grondwater wordt onttrokken, neemt de kwelflux af met 0.25 tot 1.0 mm/dag. Dit kan grote gevolgen hebben voor kwelafhankelijke natuur die eventueel in dit gebied aanwezig zou kunnen zijn. Of dit het geval is, is in deze studie niet nagegaan en verdient vanzelfsprekend meer aandacht bij een eventuele verdere verkenning op een meer lokale schaal.



*Figuur 3.20 Effect van grondwaterwinningen nabij kwelgebieden aangrenzend aan hogere zandgebieden op de freatische grondwaterstand [m] (boven) en de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket [m] (onder), na 50 jaar grondwater onttrekken.*

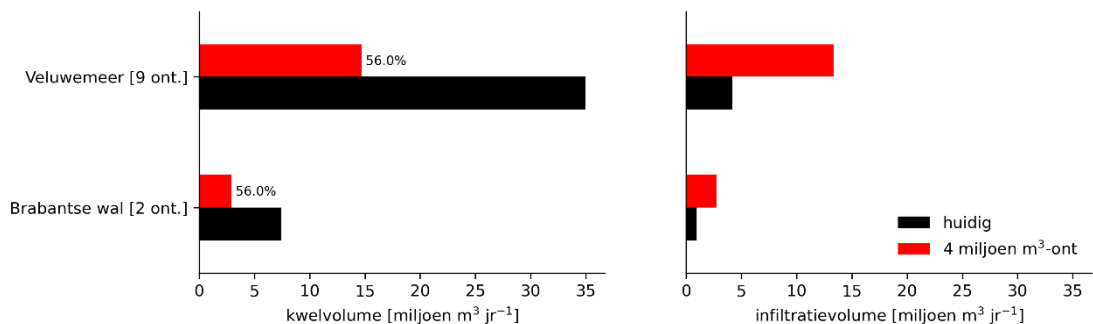
De onttrekkingen nabij de Brabantse wal geven een veel groter effect op de freatische grondwaterstand dan de onttrekkingen nabij het Veluwe randmeer, ondanks dat het totale onttrekkingsdebiet hier lager is. Dit komt waarschijnlijk omdat er veel minder grondwater vanaf de Brabantse Wal richting het zoommeer stroomt dan bij de Veluwe. Voor een groot deel is deze flux al gereduceerd door de aanwezige drinkwateronttrekkingen. Er dient te worden opgemerkt dat een deel van Brabantse Wal schijnspiegelgrondwaterstanden kent en effecten op de ondiepe grondwaterstand voor deze gebieden minder groot zijn dan in de figuren aangegeven of zelfs afwezig zijn.

De kwelflux wordt significant beïnvloed door de winningen, van 0.1 tot 0.5 mm/dag. Deze kwel komt dan niet meer aan het oppervlak aan de voet van de Brabantse Wal waar kwelafhankelijke natuur aanwezig is (Noordpolder). Voor dit gebied is het dus zeker geen goed idee om extra winningen te plaatsen aan de voet van de Brabantse Wal. Wel zouden bestaande winningen op de Brabantse Wal eventueel vervangen kunnen worden door winningen aan de voet van de Brabantse Wal.



Figuur 3.21: De huidige kwel en infiltratieflux (boven) en het effect van grondwaterwinningen op de kwel en infiltratieflux flux (mm/dag) na 50 jaar grondwater onttrekken (onder). Gele kleuren tonen een toename in neerwaartse flux (infiltratie) of afname in opwaartse flux (kwel) en blauwe kleuren tonen een toename in opwaartse flux (kwel).

De onttrekkingen nabij het Veluwe randmeer geven een groter effect op de fluxverandering dan de onttrekkingen nabij de Brabantse wal (Figuur 3.22). Dit komt omdat er 4.5 keer meer wordt onttrokken nabij het Veluwe randmeer. Op beide locaties wordt de kwelflux tot meer dan de helft gereduceerd (zie Figuur 3.21). Nabij het Veluwe randmeer wordt 20 miljoen m<sup>3</sup> kwelwater per jaar afgevangen en nabij de Brabantse Wal 5 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. In beide gebieden ontstaan er infiltratiegebieden binnen de voormalige kwelgebieden als gevolg van de verlaging van de stijghoogtes. De infiltratie neemt hier toe met respectievelijk 5 en 2 miljoen m<sup>3</sup> per jaar voor het gebied nabij het Veluwe randmeer en de Brabantse Wal.



Figuur 3.22: Het kwel- en infiltratievolume in (miljoen m<sup>3</sup>/jaar) nabij het Veluwrandmeer en de Brabantse wal voor de situatie zonder onttrekkingen (zwart) en met 4 miljoen m<sup>3</sup> onttrekkingen (rood). in het linker paneel staat de afname van de kwelflux als aandeel van het totale onttrekkingsvolume aangegeven.

### 3.5.3 Veenplassen

Anders dan bij diepe polders, zijn de onttrekkingslocaties minder goed terug te herleiden in het freatische grondwaterpakket in de veenplassen (Figuur 3.23). Dit komt doordat de onttrekkingen in veenplassen voornamelijk ondiep oppervlaktewater aantrekken, wat bij voldoende wateraanvoer geen effect heeft op het oppervlaktewaterpeil.

Voor de Nieuwkoopse en Reeuwijkse plassen is er een grote uitstraling (buiten de plassen) van de effecten op zowel de stijghoogte als de grondwaterstand te zien. Dit komt door de relatief hoge weerstand onder de plassen van het veen dat daar nog aanwezig is. Om voldoende water vanuit het ondiepe systeem richting de winningen te laten stromen is door deze weerstand een groot gebied nodig.

Voor de Loosdrechtse en Vinkeveense plassen zijn er nauwelijks effecten te zien terwijl er ongeveer evenveel wordt onttrokken (24 respectievelijk 16 miljoen m<sup>3</sup> per jaar) als voor de Nieuwkoopse plassen en Reeuwijkse plassen (beide 20 miljoen m<sup>3</sup> per jaar). Dit wordt veroorzaakt door de veel lagere weerstand tussen de plassen en het eerste watervoerende pakket en het feit dat delen van deze plassen in het verleden zijn gebruikt voor zandwinning. Door de zandwinning staan de plassen nu in directe verbinding met het eerste watervoerende pakket en is er dus lokaal nauwelijks weerstand (Tabel 3.6) tussen de plassen en het watervoerend pakket waaruit water wordt onttrokken. De winningen onder de Loosdrechtse en Vinkeveense plassen worden dus grotendeels gecompenseerd door de infiltratie van het water uit de plassen.

Tabel 3.6: Deklaagweerstand (min, gemiddeld, max) onder de onderzochte veenplassen. Door historische zandwinningen hebben delen van de Loosdrechtse en Vinkeveense plassen geen/nauwelijks weerstand.

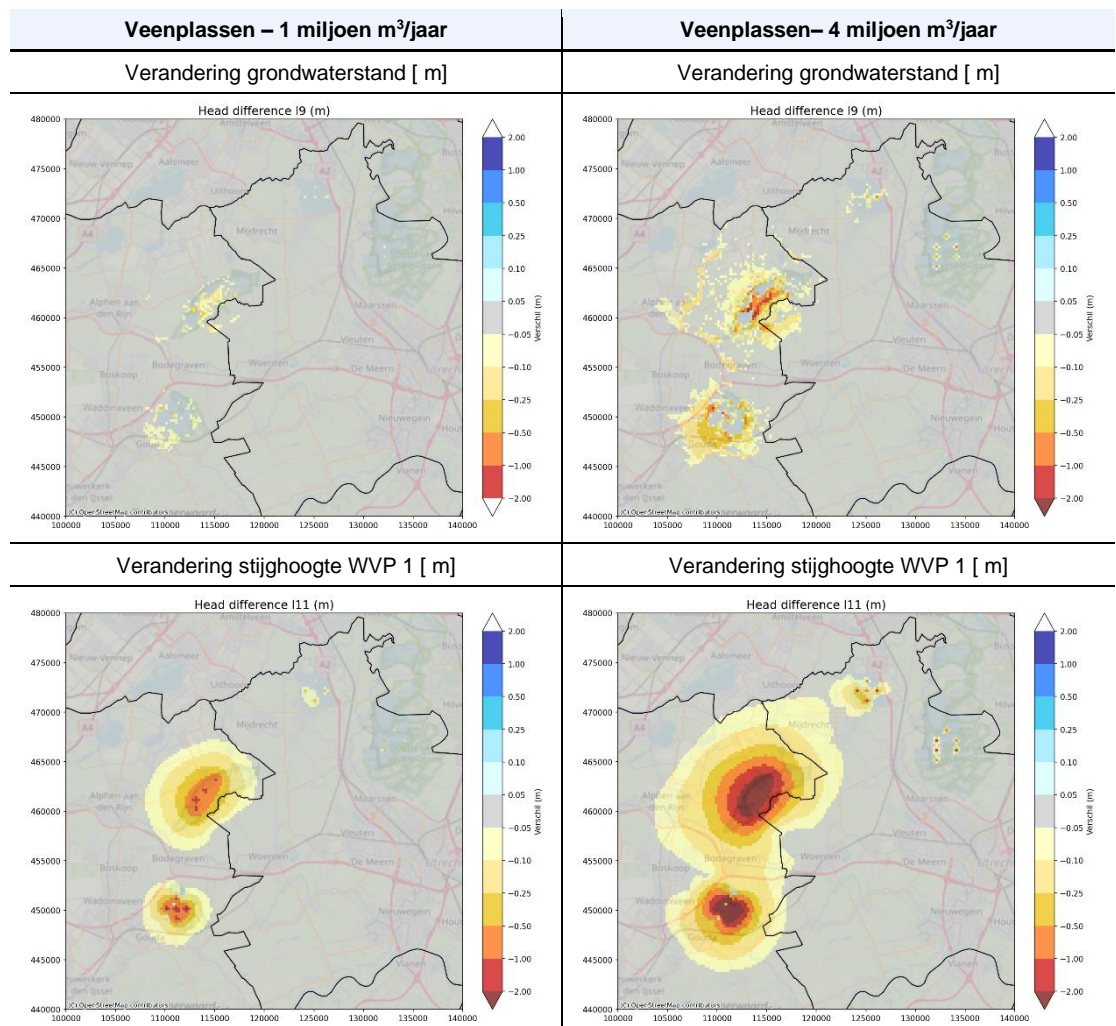
	Minimale weerstand (dag)	Gemiddelde weerstand (dag)	Maximale weerstand (dag)
<b>Loosdrechtse Plassen</b>	1	11	483
<b>Nieuwkoopse Plassen</b>	682	2652	4666
<b>Reeuwijkse Plassen</b>	1	1141	5264
<b>Vinkeveense Plassen</b>	1	286	6917

De veenplassen zijn in de huidige situatie voornamelijk grondwaterinfiltratiegebieden, desalniettemin vindt er in de Loosdrechtse en Vinkeveense plassen op jaarbasis ook een aanzienlijke kwelstroom richting de plassen plaats (Figuur 3.24). De Utrechtse Heuvelrug speelt hier ook een belangrijke rol bij als regionaal infiltratiegebied vanwaar een flinke grondwaterstroming richting het westen plaatsvindt.

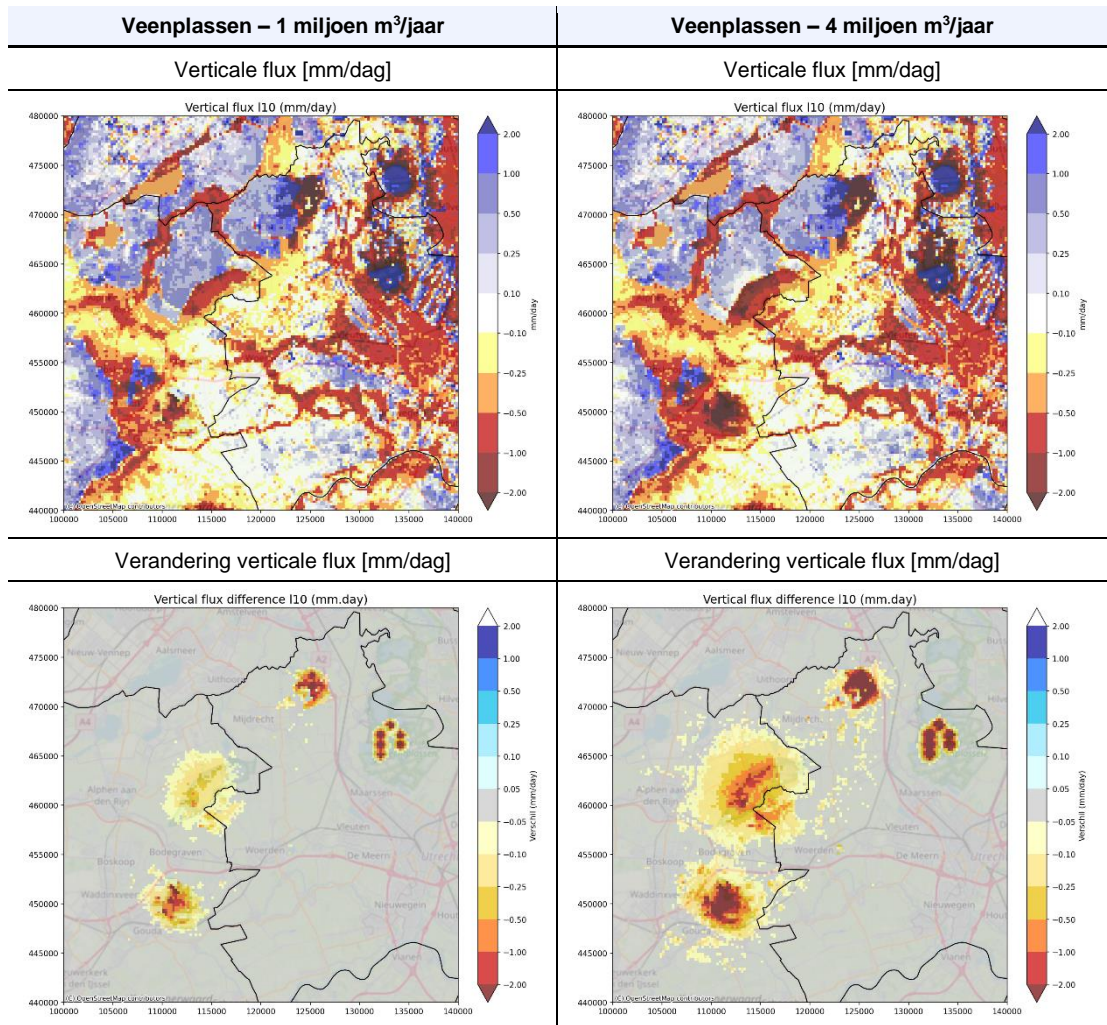
De verandering in de verticale stroming als gevolg van onttrekkingen onder de veenplassen zijn gecentreerd rondom de onttrekkingslocaties (Figuur 3.13). De winningen hebben vooral invloed op het totale infiltratievolume, de kwelfluxen blijven grotendeels onveranderd. De effecten zijn fors groter bij het scenario met onttrekkingen van 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar dan voor het scenario met onttrekkingen van 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Voor dat scenario geldt dat de infiltratie minimaal verdubbeld, maar voor de Reeuwijkse plassen is dit effect nog veel sterker omdat er in de huidige situatie nauwelijks sprake is van infiltratie. In Figuur 3.25 is ook het totale onttrekkingsvolume als aandeel van het infiltratievolume weergegeven.

Dit laat zien dat voor de Loosdrechts- en Vinkeveense plassen de theoretische wateronttrekking grotendeels kan worden voorzien door middel van infiltrerend oppervlaktewater, hoewel dit niet uitsluit dat water ook elders kan worden aangetrokken voor de winning.

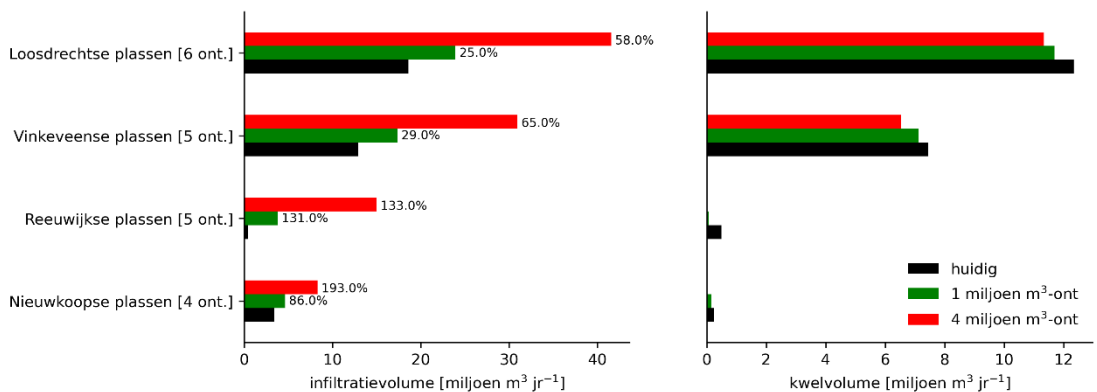
In het geval van de Reeuwijkse plassen en Nieuwkoopse plassen is infiltrerend oppervlaktewater van de plassen echter onvoldoende om het benodigde winningsdebiet te dekken. Dit komt door de relatief hoge weerstand van de Holocene deklaag tussen het pakket waaruit onttrokken wordt en het oppervlaktewater. Hierdoor stralen de effecten tot ver buiten de plassen uit. In de huidige situatie is de infiltratie in de Nieuwkoopse plassen en Reeuwijkse plassen respectievelijk 0.4 en 0.2 mm/dag en dit wordt 1.0 en 3.0 mm/dag bij onttrekkingen met een debiet van 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar.



**Figuur 3.23** Effect van grondwaterwinningen onder veenplassen op de freatische grondwaterstand [m] (boven) en de stijghoogte van het eerste watervoerend pakket [m] (onder), na 50 jaar grondwater onttrekken.



Figuur 3.24 De huidige kwel en infiltratieflux (boven) en het effect van grondwaterwinningen op de kwel en infiltratieflux flux (mm/dag) na 50 jaar grondwater onttrekken (onder). Gele kleuren tonen een toename in neerwaartse flux (infiltratie) of afname in opwaartse flux (kwel) en blauwe kleuren tonen een toename in opwaartse flux (kwel).



Figuur 3.25: Infiltratie- en kwelvolume in (miljoen m³/jaar) veenplassen voor situatie zonder onttrekkingen (zwart), met 1 miljoen m³ onttrekkingen (groen) en met 4 miljoen m³ onttrekkingen (rood). In het linker figuur staat het onttrekkingsvolume als aandeel van het totale infiltratievolume aangegeven. Dit geeft informatie over de oorsprong van het water en efficiëntie van de winning.



## 3.6 Conclusie en discussie

Deze modelstudie laat zien dat in laag-Nederland op grote schaal kwel plaats vindt. Het totale kwelvolume in laag-Nederland is 1635 miljoen m<sup>3</sup> per jaar en dat is groter dan de totale drinkwatervraag in Nederland (818 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (CBS, 2021)). Een groot deel van deze kwel is echter niet winbaar, omdat de kwel te zout is of de winning te veel neveneffecten heeft. Deze neveneffecten zijn bijvoorbeeld een te grote en structurele verlaging van de grondwaterstand die nadelig kan zijn voor landgebruik, natuur, bebouwing en infrastructuur of bodemdaling in de hand werkt.

In deze studie is geprobeerd om een overzicht te maken van kansrijke kwelgebieden voor het winnen van grondwater voor drinkwater en voor deze gebieden inzicht te krijgen in de effectiviteit en neveneffecten van twee verschillende winmethoden: oppervlaktewaterwinning en diepe onttrekking. Daarnaast is het winnen van grondwater onder veenplassen nader verkend.

### 3.6.1 Oppervlaktewaterwinning in diepe kwelpolders

Met behulp van deze methode wordt het kwelwater dat in de polder opkwelt, samen met het neerslagoverschot via het oppervlaktewatersysteem gewonnen. Om jaarrond te kunnen winnen moet er sprake zijn van een dermate sterke kwelflux, zodat er ook in de zomer sprake is van een positieve waterbalans (kwel moet dan groter zijn dan de verdamping). Indien dit het geval is, heeft deze methode als voordeel dat je ook een deel van het neerslagoverschot kunt winnen. In deze studie zijn voor 17 geselecteerde kwelpolders waterbalansen opgesteld om de duur en omvang van het netto overschot te bepalen en zo te beoordelen welke gebieden geschikt zijn voor kwel-oppervlaktewaterwinning. Een dermate sterke kwelflux komt alleen voor in de polders Horstermeer, Bethunepolder en Koekoekspolder, waar kwelfluxen van >10 mm/d voorkomen. Het winbare volume ligt in deze polders samen rond de 60 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Voor de Horstermeer is het winbare volume echter licht-brak door het brakke grondwater dat in de midden van de polder opkwelt en dient er ontzilting plaats te vinden.

Overige gebieden zijn wellicht wel interessante plekken om in de winter in te zetten voor drinkwaterproductie als aanvulling op andere winningen. Polders die hiervoor in aanmerking komen zijn: Tempelpolders, Vrouwenverdriet, Noordmeer en Bijlmermeer. In deze polders kan samen rond de 10 miljoen m<sup>3</sup> per jaar gewonnen worden gedurende de natte helft van het jaar. Ook kan een combinatie van passieve en actieve kwelwaterwinning een mogelijkheid zijn. Door bijvoorbeeld te schakelen tussen zomer (actief) en winter (passief) winningen.

Een voordeel van deze winmethode is dat effecten op de omgeving erg beperkt zijn, maar een nadeel is dat het kwelwater mengt met het oppervlaktewater en het risico op verontreinigen daardoor hoger is. Daarnaast speelt dat het er in veel polders brakwater op kwelt waardoor er ontzilting (reversed osmosis) moet plaatsvinden. Het daadwerkelijke volume voor de bereiding van drinkwater is daarmee lager dan de in de rapport gerapporteerde waarden. Als vuistregel kunnen de volgende terugwinpercentages worden aangenomen (Coaster, n.d.; Beerendonk, 2014):

- Voor zoete kwel met een zoutconcentratie kleiner dan 150 mg/l hoeft geen *reversed osmosis* te worden toegepast (100% terugwinning).
- Voor kwel met een zoutconcentratie tussen 150 mg/l en 1500 mg/l is een terugwinning van 75% aangenomen;
- Voor kwel met een zoutconcentratie tussen 1500 mg/l en 5000 mg/l is een terugwinning van 50% aangenomen.

### 3.6.2 Onttrekkingen in diepe kwelpolders

De effectiviteit van een (kwel)onttrekking wordt bepaald door de mate waarin het lukt om vooral kwelwater (grondwater dat anders zou opkwellen in de polder) te onttrekken en eventuele negatieve effecten (verlaging grondwaterstanden, verzilting, etc.) te beperken. Daarnaast kunnen onttrekkingen ook voor positieve neveneffecten zorgen, zoals het verminderen van de zoutvracht door zoute kwel. Hoe deze balans van factoren uitvalt, bepaalt of een locatie

geschikt is voor drinkwaterwinning. De keuze voor de exacte plaatsing en het debiet van de onttrekking heeft hier uiteraard invloed op. Het doel van deze studie is dan ook vooral inzicht te verschaffen in de processen die in gang worden gezet door een onttrekking en het afwegingskader te schetsen. Hiervoor zijn voor een aantal geselecteerde polders twee onttrekkingsscenario's gesimuleerd met respectievelijk een hoog en laag onttrekkingsvolume. Het hoge onttrekkingsscenario komt ongeveer overeen met het totale kwelvolume van de polder (met winningen van 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar) en het lage onttrekkingsscenario bedraagt een kwart hiervan (met winningen van 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar).

Tabel 3.7 toont voor elke polder die in deze studie is onderzocht een aantal factoren die inzicht geven in de effectiviteit en de neveneffecten van een onttrekking. In groen en rood zijn de polders aangegeven die respectievelijk goed of slecht scoren op een specifiek onderdeel. Vanuit het perspectief van de drinkwaterwinning is één beoordelingscriterium uitermate belangrijk: is het onttrokken water geschikt voor verder behandeling tot drinkwater? Voor een aantal polders (Schermer, Wieringermeer Noord & Wijdewormer) is het zoutconcentratie van het water boven de 5 g Cl/L, waardoor kostenefficiënte drinkwaterproductie op dit moment niet realistisch is.

Neveneffecten van diepe onttrekkingen, zoals het verlagen van de grondwaterstand en het verplaatsen van de zoetzout-verdeling, mogen niet tot schade (verzilting, bodemdaling, etc.) leiden. In alle diepe polders waar onttrekkingen zijn geplaatst neemt de kwelflux af, maar de mate waarin dit de freatische grondwaterstand beïnvloedt verschilt sterk. Polder Horstermeer, Koekoekspolders, Zuidplaspolder en Wieringermeer scoren het hoogst op het effectief afvangen van kwel. De oorspronkelijke kwelflux wordt sterk gereduceerd en dit dekt hiermee tussen de 58% en 75% van het totale onttrekkingsvolume. Een hoge efficiëntie leidt naar verwachting tot relatief weinig neveneffecten in de omgeving, omdat vooral het kweloverschot wordt afgevangen. Dit geldt echter maar beperkt voor de Horstermeer en Wieringermeer, waar toch nog aanzienlijke verlagingen van het grondwaterpeil worden gemodelleerd. Zeker bij de Wieringermeer zijn de verlagingen, ook buiten de onttrekkingslocaties, zo hoog dat de winning zoals gemodelleerd is niet realistisch lijkt.

Polder Schermer en Waverveen hebben een kleiner effectiviteitspercentage (<50%), vermoedelijk omdat de kwelfluxen hier minder sterk zijn. Voor de polder Schermer leiden de onttrekkingen ook tot een zeer sterke verlaging van de freatische grondwaterstand. Aangezien de kwel hier verspreid over het gebied binnenkomt, hebben de onttrekkingen vermoedelijk ook sterke effecten op gebieden met relatief weinig kwel. Bij Waverveen zijn de effecten op de freatische grondwaterstand juist erg beperkt, waarschijnlijk omdat op de locatie van de onttrekkingen de polder geconcentreerd kwelwater ontvangt vanuit de Vinkeveenseplassen. De onttrekkingen hier zullen waarschijnlijk wel tot extra infiltratie in de Vinkeveenseplassen leiden en daarmee een hogere watervraag.

Een verlaging van de grondwaterstand is in veel van de onderzochte polders ongewenst, omdat deze klei- of veenbodems hebben. Een verlaging van de grondwaterstand kan hier leiden tot bodemdaling door compactie en veenoxidatie, waardoor de polders nog lager komen te liggen en het waterbeheer verder bemoeilijkt wordt. Polders met een kleibodem, zoals de Schermer, Beemster en Purmer, zijn minder gevoelig voor bodemdaling dan polders met een veenbodem, zoals Waverveen, Middelburg-Tempelpolder en een deel van de Zuidplaspolder. Bovendien kan een verlaging van de grondwaterstand in deze polders ook tot meer CO<sub>2</sub>-uitstoot door veenoxidatie leiden wat in strijd is met de gestelde landelijke reductiedoelen. Indien een maximale verlaging van 10 cm wordt aangehouden, vallen veel polders bij zowel het lage en hoge onttrekkingsscenario af. Voor een aantal polders wordt deze grens niet overschreden bij het lage onttrekkingsscenario: Horstermeer, Waverveen, Purmer, Wijdewormer, Koekoekspolder en Zuidplaspolder.

De verandering van overheersende kwelflux naar een meer infiltrerend karakter in de polders zorgt in een aantal polders voor een aanzienlijke verzoeting en daarmee verlaging van het zoet-zout grensvlak, zoals de Wieringermeer, Schermer, Wijdewormer, Purmer en het westen van de Flevopolder. Dit effect spreidt zich ook uit tot ver buiten de randen van de polders. Dit betekent ook dat de zoutvracht aanzienlijk wordt gereduceerd, waardoor doorspoeling met zoetwater (in droge zomers) niet of minder nodig is. Dit effect is een positief neveneffect van de onttrekking en is voornamelijk sterk in het hoge onttrekkingsscenario bij de polder Horstermeer, Waverveen, Purmer en Schermer.

Tabel 3.7: Samenvatting van effecten van onttrekkingen bij de verschillende onderzocht polders. Eerste getal geeft de effecten van het lage scenario met onttrekkingen van 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar weer; het tweede getal de effecten van het hoge scenario met onttrekkingen van 4 miljoen m<sup>3</sup> per jaar.

	Effectief kwel afvangen [%]	Gem. verlaging grondwater op onttrekkingslocaties [m]	verlaging grondwater buiten onttrekkingslocaties (gemiddelde van cellen > 5cm verlaging) [m]	Areaal verlaging >5 cm in polder [ha]	Reductie zoutvracht [%]	Zoutgehalte onttrekkingswater (gem. van punten) [g/L]
Horstermeer [4 ont.]	75.0   58.0	0.45   2.75	0.10   0.54	288   631	43.7   95.8	1.0   0.9
Tempelpolder [1 ont.]	60.0   50.0	0.59   4.82	0.11   0.86	25   138	n.r.	0.1   0.1
Waverveen [3 ont.]	47.0   46.0	0.08   0.53	0.06   0.22	25   206	15.3   59.4	2.7   3.3
Schermer [2 ont.]	45.0   33.0	3.13   20.28	0.30   3.40	263   750	20.7   46.4	9.0   9.0
Wieringermeer noord [4 ont.]	76.0   68.0	3.78   17.72	0.14   0.94	1450   5475	14.0   47.6	7.1   7.3
Wieringermeer zuid [5 ont.]						4.9   4.8
Purmer [3 ont.]	53.0   48.0	0.27   4.07	0.09   0.60	106   1325	22.3   65.8	2.6   2.9
Wijdewormer [2 ont.]	55.0   45.0	0.31   1.63	0.07   0.29	44   400	20.8   62.2	6.0   6.7
Beemster [3 ont.]	57.0   44.0	0.98   8.55	0.14   1.06	325   2138	10.8   40.7	1.3   2.7
Koekoekspolder [4 ont.]	75.0   69.0	0.18   1.21	0.07   0.44	162   556	n.r.	0.1   0.1
Zuidplaspolder [2 ont.]	75.0   64.0	0.19   2.59	0.08   0.49	144   825	n.r.	0.3   0.3
Flevopolder oost [20 ont.]	73.0   61.0	1.17   5.56	0.11   0.60	5875   15831	14.2   48.1	0.1   0.2
Flevopolder west [14 ont.]						2.9   3.0
Noordoostpolder [21 ont.]	70.0   58.0	1.28   7.41	0.15   0.93	2681   7431	6.4   24.6	0.2   0.3

Dicht bij de onttrekkingslocaties zelf stijgt het zoet-zoutgrensvlak doordat direct onder de onttrekking zout grondwater omhoog wordt getrokken (zoutwater opkegeling). In de

Noordoostpolder, Beemster, Tempelpolder en Zuidplaspolder zijn deze nadelige effecten overheersend.

Al met al vallen een aantal polders op vanwege de beperkte neveneffecten en een geschikt zoutgehalte voor de winning. Dit zijn de polders Horstermeer, Waverveen, Purmer, Koekoekspolder en de Zuidplaspolder. In het lage onttrekkingsscenario zijn de neveneffecten beperkt en overschrijdt het onttrokken water niet de zoutwaternorm. Voor polder Hostermeer, Waverveen en Purmer, leiden de onttrekkingen ook tot een reductie van de zoutvracht van ca. 20% tot 40%. Cumulatief leveren deze onttrekkingen in het lage scenario 16 miljoen m<sup>3</sup> water per jaar op geschikt voor de bereiding van drinkwater.

### 3.6.3 Kwelgebieden aangrenzend aan hogere zandgebieden

Aan de voet van hoger gelegen zandige infiltratiegebieden bevinden zich vaak sterke kwelgebieden waar relatief schoon en oud water opwelt. Het afvangen van deze kwel voor de productie van drinkwater voordat dit water vermengd raakt met oppervlaktewater van lagere kwaliteit is mogelijk door middel van diepe onttrekkingen. De neveneffecten moeten echter wel beheersbaar zijn. Om inzicht te krijgen op het onttrekkingen gesimuleerd in het gebied ten westen van de Veluwe langs het Veluwemeer en het gebied aan de voet van de Brabantse wal. De simulaties geven een bovenbandbreedte aan, aangezien de onttrekkingen ongeveer gelijk zijn aan het totale kwelvolume in deze gebieden. Verandering in het zoet-zout grensvlak en het verzilten van de winning spelen gezien de ligging van deze gebieden geen grote rol.

De onttrekkingen hebben een significante verlaging van de stijghoogte en freatische grondwaterstand en deze is bij de Brabantse Wal relatief veel sterker (tot 2 m) dan bij het Veluwemeer. De effecten bij het Veluwemeer van de onttrekkingen op de grondwaterstand in de bovenste laag zijn beperkter in omvang, maar lopen wel op tot 25 cm. De geringere effecten bij de Veluwe worden vermoedelijk veroorzaakt door veel sterkere grondwaterstroming, grotere grondwatergradiënt vanaf de Veluwe en de afwezigheid van een significante scheidende laag tussen het freatisch systeem en het eerste watervoerende pakket, in vergelijking met de Brabantse Wal. Het uitstralingsgebied met effecten blijft daarom ook beperkt tot een kleiner gebied.

Voor beide gebieden geldt dat de uitstralingseffecten op de grondwaterstand en stijghoogte zich vooral verplaatsen richting het hoger gelegen gebied. Dit komt omdat hier geen ontwatering aanwezig is.

In beide locaties wordt als gevolg van de onttrekkingen de kwelflux tot meer dan de helft gehalveerd (reductie van 56%). Dat betekent tevens dat ook water uit de omgeving wordt aangetrokken en de infiltratie van oppervlaktewater en ondiep grondwater in het gebied toeneemt.

Aan de voet van de Brabantse Wal liggen enkele bijzondere en van kwel afhankelijke natuurgebieden. De bekendste is de Noordpolder van Ossendrecht ten noordwesten van Ossendrecht met een grootte van 128 ha, welke eigendom is van Natuurmonumenten. Dit natuurgebied kent bijzonder kwelafhankelijke vegetatie en een reductie van de kwel in dit gebied heeft zeer waarschijnlijk een ongewenst effect. Daarmee lijken extra winningen in dit gebied niet kansrijk.

Wel zouden bestaande winningen op de Brabantse Wal eventueel vervangen kunnen worden door winningen aan de voet van de Brabantse Wal. Het netto effect op de kwel aan de voet van de Brabantse Wal zou dan nihil kunnen zijn. Door het vervangen van deze bestaande winningen kunnen de negatieve effecten op het NATURA2000-gebied het Groote Meer verdwijnen. Dit scenario, het uitzetten van bestaande winningen op de Brabantse Wal en vervangen door winningen aan de voet de wal, is in deze studie niet verder onderzocht.

Een alternatief dat geen gevolgen heeft voor de kwelafhankelijke ecosystemen, is het opvangen van de kwel nadat het in het oppervlaktewater in de Noordpolder is uitgetreden

(oppervlaktewaterwinning). Dit kwelwater wordt momenteel samen met het neerslagoverschot afgevoerd naar de Oosterschelde.

Voor het gebied aan de voet van de Veluwe spelen mogelijk ook negatieve effecten op kwelafhankelijke vegetatie maar dit is niet verder onderzocht. Kwelfluxen zijn hier groter en negatieve effecten kunnen daarmee beperkt blijven, zeker als met lagere debieten wordt onttrokken.

In dit gebied nabij het Veluwemeer wisselen zand, klei en veenbodems elkaar op een klein gebied af en grondwaterstandsverlagingen kunnen lokaal leiden tot meer bodemdaling en veenoxidatie. Aangezien de bodem richting het oosten steeds zandiger wordt, zou er kunnen worden gekeken of het mogelijk is om de onttrekking richting het oosten te verplaatsen om zo de freatische effecten ter hoogte van de veen- en kleibodems te beperken.

#### 3.6.4 Veenplassen

De veenplassen die in deze studie zijn onderzocht vormen in de huidige situatie netto infiltratiegebieden. In het zomer halfjaar moet de infiltratie worden gecompenseerd met het aanvoeren van oppervlaktewater, terwijl in de winter het neerslagoverschot hier grotendeels voor zorgt. Het plaatsen van onttrekkingen onder deze plassen, zorgt voor meer infiltratie van oppervlaktewater, waarbij de bodempassage die hierbij plaats vindt een positief neveneffect vormt voor de productie drinkwaterproductie. De effectiviteit van winning wordt onder andere bepaald door de weerstand van de resterende deklaag onder de plassen. De uitgevoerde simulatie geeft inzicht in de potentie van deze onttrekkingen en de neveneffecten rondom de plassen. Twee onttrekkingsscenario's zijn onderzocht: een laag onttrekkingsscenario en een hoog onttrekkingsscenario beide afgestemd op het totale oppervlakte van de plas.

De onttrekkingen leiden in alle gevallen tot een sterke toename van infiltratie in de plassen. Voor de Loosdrechts plassen en Vinkeveense plassen wordt de wateronttrekking grotendeels gedekt met infiltrerend oppervlaktewater, hoewel dit niet uitsluit dat water ook elders kan worden aangetrokken voor de winning. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat deze plassen deels in open verbinding met het eerste watervoerend pakket staan. Daardoor zijn ook de effecten van de winning op de stijghoogte en de grondwaterstand erg beperkt. Dit maakt deze locaties geschikt voor waterwinning. Er dient daarbij wel aandacht te zijn voor de extra aanvoer van voldoende oppervlaktewater in de zomer om peilverlaging van de plassen door de winning te voorkomen. De mogelijkheden hiervoor zijn in deze studie niet verder onderzocht.

In het geval van de Reeuwijkse plassen en Nieuwkoopse plassen is het infiltrerend oppervlaktewater onvoldoende om het benodigde winningsdebiet te dekken. Bij deze plassen vindt daarom ook een grondwaterstandsverlaging in een groot gebied rondom de plassen plaats van meer dan 25 cm, en stijgt het zoet-zout grensvlak. De hoge bodem- en deklaagweerstand zorgt ervoor dat er weinig water via de plassen wordt aangetrokken en de effecten op de omgeving groot zijn. Gezien de ligging van de Reeuwijkse en Nieuwkoopse plassen in een kwetsbaar veenweidegebied en naast de oude binnenstad van Gouda, is een grondwaterstandsverlaging hier zeer ongewenst. Deze plassen zijn dus niet geschikt voor een waterwinning.

Aannemend dat er in de zomermaanden voldoende zoetwater kan worden aangevoerd naar de Loosdrechtse en Vinkeveenseplassen, is het winbare volume samen tussen de 20 en 40 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Het is de vraag of de toename in de watervraag in dit gebied gewenst is, omdat de watervraag ook al toeneemt door andere factoren zoals klimaatverandering en de grootschalige uitrol van vernattingsmaatregelen in het veengebieden om CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen.

## 4 Potentie van grootschalige kunstmatige infiltratie

### 4.1 Inleiding

Zoetwatervoorraden vergroten kan door het extra infiltreren van zoet water ook wel aangeduid als kunstmatige infiltratie. Het te infiltreren extra zoet water kan overtollig regenwater, rivierwater of gezuiverd effluent van RWZI of industrie zijn. Het creëren van extra zoetwatervoorraden via extra infiltratie kan grofweg door (1) gebruik te maken van de ruimte in de onverzadigde zone boven de grondwaterstand en (2) het verdringen van zout grondwater door zoet grondwater. Beide processen worden verder in dit hoofdstuk nader toegelicht. Naast dat er extra zoet grondwater beschikbaar komt voor onttrekkingen, kan extra infiltratie ook worden toegepast om effecten van onttrekkingen te mitigeren. Hierdoor groeit de zoetwatervoorraad niet maar worden negatieve effecten op het freatische systeem verminderd of voorkomen.

Hoewel er op kleine schaal initiatieven zijn om de zoetwaterbeschikbaarheid via extra infiltratie te vergroten, kijken we in deze studie naar grootschalige infiltratie van minimaal 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, waarbij we naar 2 vormen van grootschalige infiltratie kijken:

1. Het aanvullen van het grondwatersysteem door infiltratie van water aan het oppervlak via bijvoorbeeld infiltratievijvers waarbij het water door de zwaartekracht via de onverzadigde zone naar het grondwater percoleert. Deze vorm wordt verder aangeduid als **MAR** dat staat voor Managed Aquifer Recharge.
2. Het aanvullen van het grondwatersysteem door de injectie van water via grondwaterputten. Het onttrekken van het geïnjecteerde water vindt vaak weer via dezelfde put plaats. Deze vorm wordt verder aangeduid als ASR dat staat voor Aquifer storage and recovery ([Aquifer storage and recovery | STOWA](#)). In feite is **ASR** een bijzondere vorm van MAR maar worden de twee termen ter onderscheid in de rapportage apart gehanteerd.

Bij deze verkenning naar de potentie van grootschalige infiltratie als aanvullende bron voor de drinkwatervoorziening wordt vooral gekeken naar de fysieke mogelijkheden die de ondergrond biedt en worden hydrologische effecten gekwantificeerd met het Landelijke Hydrologisch Instrumentarium (LHM). Het transport en beschikbaarheid van infiltratiewater, de eventuele noodzaak tot voorzuiveren, als ook de (maatschappelijke) kosten worden grotendeels in deze verkenning buiten beschouwing gelaten. Alleen voor MAR zijn voor deze studie hydrologische berekeningen met het LHM uitgevoerd.

### 4.2 MAR en ASR nader beschouwd

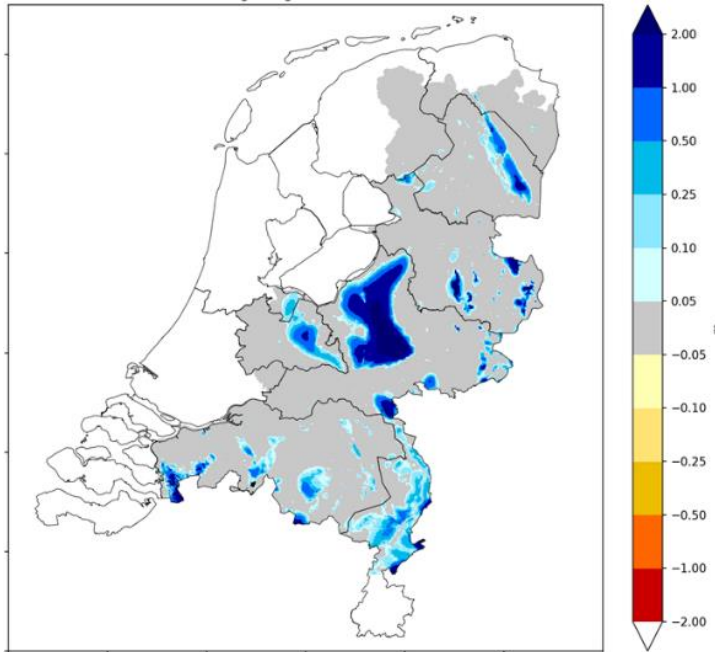
In deze paragraaf wordt nader ingegaan op het fysische proces van MAR en ASR en worden enkele afgeronde studies en reeds werkende systemen kort besproken.

#### 4.2.1 MAR-systemen

*Ruimte boven het grondwater of verdringen van zout grondwater*

Hoe dieper de grondwaterstand, hoe meer ruimte om extra water op te slaan. Voor (tijdelijke) opslag van water door kunstmatige infiltratie van water zijn de trage gebieden met diepe grondwaterstanden (2,5 tot 70 m beneden maaiveld) erg geschikt (De Louw, et al., 2022). Hoe dieper de grondwaterstand, des te meer ruimte er is om grondwater op te slaan in de ondergrond. Voor de droogtestudie (Van den Eertwegh et al., 2021) is deze oplossingsrichting doorgerekend door 100 mm jaarlijks extra te infiltreren (via infiltratievijvers) voor gebieden met een grondwaterstand dieper dan 2.5 m. De extra grondwateraanvulling leidt dan tot een stijging van de grondwaterstand van enkele meters zoals in Figuur 4.1 is te zien. Een groot voordeel

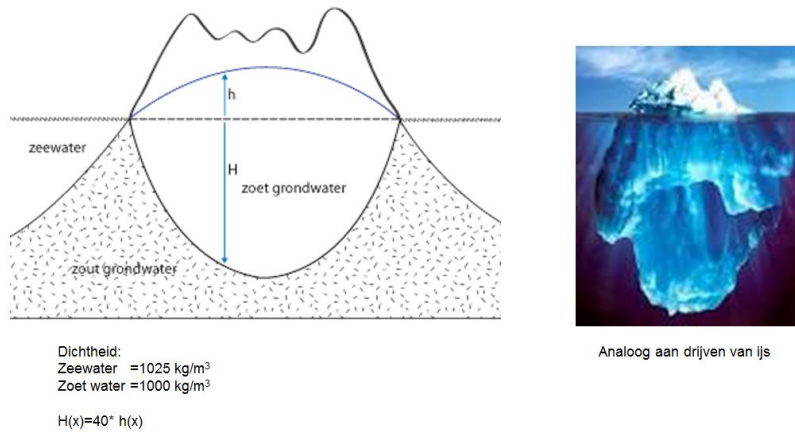
van deze traag reagerende gebieden is dat het geïnfiltreerde water er relatief lang wordt vastgehouden door de afwezigheid van ontwatering. Hoe groter de slootafstand, hoe trager de afvoer van het grondwater. Extra grondwateraanvulling leidt naast een vergroting van de grondwatervoorraad tot extra afvoer en kwel aan de flanken van de hoger gelegen gebieden, dit kan in stedelijk gebied mogelijk tot wateroverlast leiden.



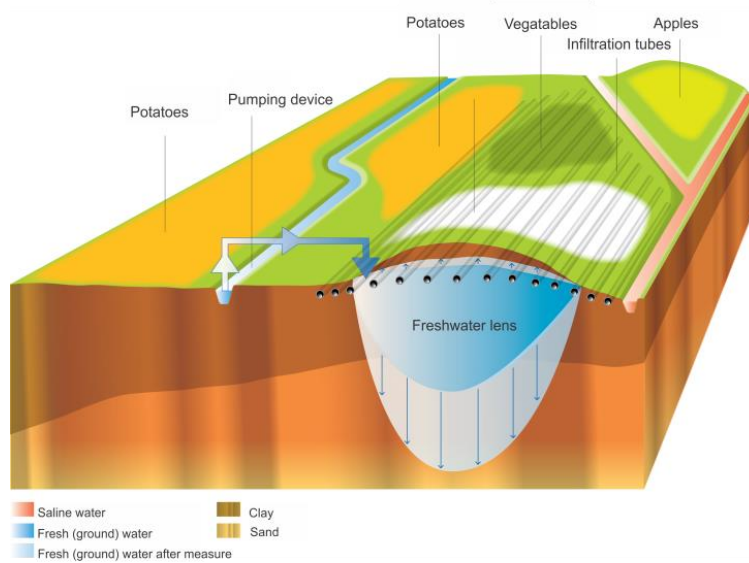
*Figuur 4.1 Het berekende effect op de freatische grondwaterstand (LG3) voor 2018 als gevolg van kunstmatige infiltratie van 100 mm per jaar, 6 jaar na uitvoering (uit De Louw et al., 2022)*

Onder de grondwaterstand is er nauwelijks ruimte voor extra water want alle poriën zijn al gevuld. Bij aanwezigheid van klei en veenlagen kan de samendrukbaarheid van deze slappe lagen voor wat extra bergingsruimte zorgen maar vergeleken met wat er boven de grondwaterstand kan worden geborgen is dat nihil.

Onder de grondwaterstand kan wel zoet grondwater worden geborgen als het aanwezige zoute grondwater wordt weggedrukt. In zoute gebieden drijft het lichtere zoetwater als het ware in het zoute grondwater, analoog aan het drijven van het lichtere ijs in water (zie Figuur 4.1). De wet van Archimedes is hierop van toepassing waarbij de opwaartse kracht die de zoetwaterbel in het zoute water ondervindt, even groot is als het gewicht van de verplaatste hoeveelheid zout water. Daarmee geldt dat hoe hoger de grondwaterstand boven het zoutwaterniveau ( $h$ ) uitsteekt, hoe dikker de zoetwaterlens ( $h+H$ ). In een homogeen zandpakket zonder belemmerende kleilagen en uitgaande van zeewater met een dichtheid van  $1025 \text{ kg/m}^3$  geldt  $H=40 \cdot h$  en wordt de Badon-Ghyben Herzberg (BGH)-relatie genoemd. Uitgaande van een 1 m hogere grondwaterstand bevindt de onderkant van de zoetwaterbel zich op 40 m beneden het zoute waterniveau en is op deze manier in evenwicht met het omringende zoute grondwater. Het laten groeien van de zoetwaterbel kan daarom alleen wanneer de grondwaterstand structureel wordt verhoogd (of de zoutwaterdruk wordt verlaagd). Theoretisch zou elke 10 cm verhoging kunnen leiden tot een groei van de zoetwaterbel met 4 m ( $40 \times 10 = 400 \text{ cm}$ ). Uiteraard is deze theoretische benadering nooit exact conform de werkelijke situatie omdat bijvoorbeeld wordt uitgegaan van een homogene ondergrond maar de beschouwing geeft wel goed de werking van de processen weer.



Figuur 4.2 Het drijven van een zoetwaterbel in zout grondwater volgens het Badon-Ghyben Herzberg principe



Figuur 4.3 De vergroting van de zoetwaterbel in een kreekrug door structurele verhoging van de grondwaterstand en kunstmatige infiltratie van zoet oppervlaktewater via een gekoppeld peilgestuurd drainagesysteem (Kreekrug Infiltratiesysteem, Pauw et al., 2015)

Bij een pilot in Serooskerke (Walcheren) die in 2013 is gestart is het BGH-principe toegepast en wordt via een Kreekrug Infiltratiesysteem de bestaande zoetwaterbel in een kreekrug vergroot (zie Figuur 4.3, Pauw et al., 2015). Het infiltreren gebeurt via een gekoppeld en peilgestuurd drainagesysteem (drainagebuizen worden hier ingezet als infiltratiebuizen). Het zoete oppervlaktewater wordt in tijden van neerslagoverschot in het systeem gepompt en het grondwaterpeil wordt structureel verhoogd door het verhogen van het drainageniveau. De verhoging van de grondwaterstand leidt tot een uitbreiding van de zoetwaterlens onder de kreekrug volgens het Badon-Ghyben Herzberg principe. Sinds de start van deze pilot is de zoetwaterbel zo'n 5-6 meter gegroeid.



### *Bestaande MAR-systemen*

Kunstmatige infiltratie wordt toegepast om het grondwater actief aan te vullen. De bekendste voorbeelden in Nederland zijn de duininfiltraties die sinds de jaren 1950 worden toegepast ten behoeve van de drinkwatervoorziening. Het grondwater in de duinen wordt actief aangevuld met voorgezuiverd rivierwater (Maas, Lek en/of IJsselmeer) om te compenseren voor de onttrekking; zo blijft de zoetwaterbel in de duinen op peil en de bodempassage zorgt voor microbiologisch betrouwbaar water (overgenomen uit Van Dooren et al., 2022).

- Waternet haalt ongeveer twee derde van hun drinkwater uit het Lekkanaal bij Nieuwegein dat via 3 grote pijpen van ongeveer 55 kilometer lang naar de Amsterdamse Waterleidingduinen wordt gepompt. Na zuivering infiltreert het water in de duinen via 40 langgerekte vijvers, de infiltratiegeulen. Via buizen in de ondergrond en in lageregelegen delen komt dit water na ongeveer 3 maanden weer aan het oppervlak en wordt het voor een laatste keer gezuiverd voordat het de waterleiding in gaat (<https://www.waternet.nl>). Het gaat om een hoeveelheid van bijna 50 miljoen m<sup>3</sup> per jaar dat Waternet op deze manier aan drinkwater produceert.
- Ook PWN maakt al heel lang gebruik van de opslag- en zuiveringscapaciteiten van de duinen. Een groot deel van jaarlijkse drinkwaterproductie van PWN die 110 miljoen m<sup>3</sup> bedraagt, vindt plaats na kunstmatige duininfiltratie. Oppervlaktewater uit de Lek en gedeeltelijk uit het IJsselmeer wordt na voorzuivering in de duinen bij Castricum kunstmatig geïnfiltreerd (<https://www.PWN.nl>).
- Dunea gebruikt oppervlaktewater uit de Afdammede Maas en transporteert het naar de duinen tussen Monster en Katwijk om het daar na zuivering te infiltreren. Na ongeveer 2 maanden wordt het water weer opgepompt en voor een laatste keer gezuiverd (<https://www.dunea.nl/>).
- Evides infiltreert oppervlaktewater uit de Haringvliet na zuivering in de duinen van Goedereede (<https://www.evides.nl/>).

Buiten de duinen vindt er nog nauwelijks grootschalige kunstmatige infiltratie plaats ten behoeve van de drinkwatervoorziening. Een uitzondering vormen de drinkwaterwinningen in Epe en Schalterberg op de Veluwe, waar nabij de onttrekkingen kunstmatige infiltratie in zogenaamde infiltratievijvers door Vitens plaats vindt (van Engelenburg, 2017; zie ook Van Dooren et al., 2022).

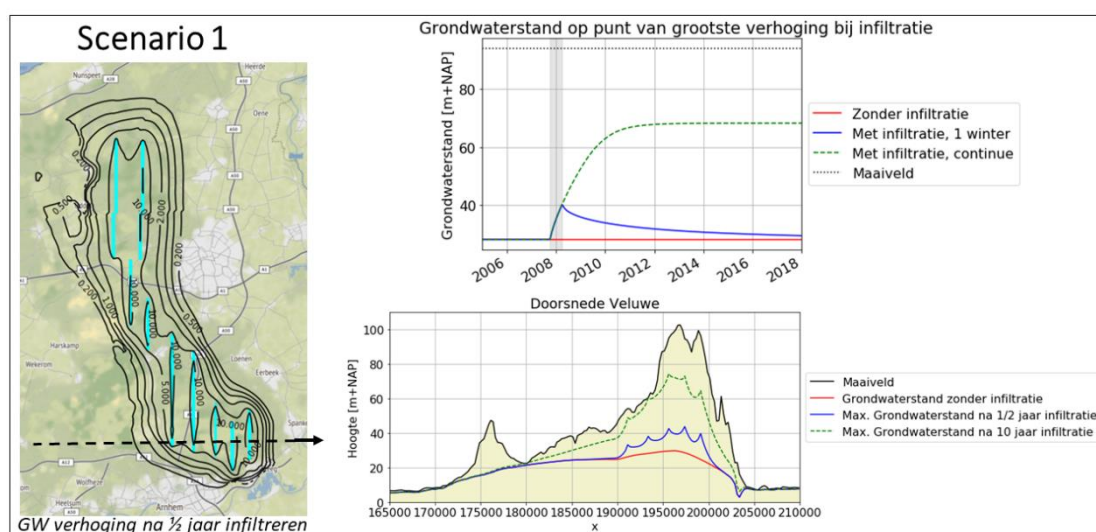
De drinkwaterwinning bij Epe is een freatische winning met een onttrekkingsvergunning voor 6 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Om negatieve effecten op de grondwaterstanden en kwel te verminderen is een infiltratieproject in 1998 gestart waar momenteel ongeveer 2.2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar wordt geïnfiltreerd. Het infiltratiewater wordt ingenomen vanuit de Klaarbeek en de Grift en is systeemeigen water afkomstig van de Veluwe en wordt getransporteerd naar de infiltratievijvers. Het streven is om uiteindelijk de gehele winhoeveelheid van de winning te compenseren zodat de netto-onttrekking daalt naar 0 m<sup>3</sup>/jaar.

De drinkwaterwinning Schalterberg is een freatische winning met een onttrekkingsvergunning van 4,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. In 2014 is het infiltratieproject bij Schalterberg in gebruik genomen voor een infiltratie van 2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Hiermee wordt het effect van de drinkwaterwinning bijna gehalveerd. Er wordt water ingenomen vanuit het eerste pand van het Apeldoorns Kanaal dat grotendeels bestaat uitgebiedseigen kwelwater. Het water wordt vervolgens getransporteerd naar de infiltratievennen die ingericht zijn op het terrein van Natuurmonumenten (van Engelenburg, 2017).

Ook bij Vitens-winning 'Olden-Eibergen' in de Achterhoek wordt kunstmatige infiltratie toegepast. Oppervlaktewater uit de Berkel wordt via compensatievijvers geïnfiltreerd, met het doel de grondwaterstandsverlagingen die effecten kunnen hebben op omringende natuur en landbouw tegen te gaan (van Engelenburg, 2017).

### Verkennd rekenen aan grootschalige infiltratie op de Veluwe

Naar aanleiding van de extreme droge jarencyclus vanaf 2018 is het oude idee voor grootschalig infiltratie uit de jaren 1970 onder leiding van de Commissie Infiltratie Veluwe (Romijn, 1975; CIW, 1976) weer nieuw leven in geblazen. Provincie Gelderland ziet actieve infiltratie van kwel uit de randmeren als een mogelijke mitigerende maatregel bij eventuele benutting van de ASV in de toekomst. Peters (2019) en De Louw (2020) opperde dat grootschalige kunstmatige infiltratie van meer dan 100 miljoen kuub per jaar op de Veluwe mogelijk zou moeten en noemde het idee respectievelijk de 'Wateraccu' en de 'Nationale Gieter'. Verkennende berekeningen van beide ideeën uitgevoerd met het Landelijk Hydrologische Model zijn gepubliceerd in H2O (De Louw et al., 2000). Zij berekenden voor de Veluwe met het LHM het effect op de grondwatervoorraad en afvoer van sprengen als gevolg van infiltratie in het winterhalfjaar van 330 miljoen m<sup>3</sup> met een infiltratiesnelheid van 100 mm per dag. De grondwaterstand stijgt ter hoogte van de infiltratie met maximaal 10 m en 5 jaar na infiltratie was 55% van het geïnfiltreerde water nog onder de Veluwe aanwezig (zie Figuur 4.4; De Louw et al., 2020). Daarnaast nam de afvoer van sprengen en bronbeken behoorlijk toe. Dit toont aan dat de zogenaamde trage gebieden met diepe grondwaterstanden en afwezigheid van ontwatering in principe geschikt zijn om extra water tijdelijk op te slaan.



Figuur 4.4 Effect op grondwaterstand als gevolg van de infiltratie van 330 miljoen m<sup>3</sup> gedurende het winterhalfjaar op de Veluwe waarbij links het ruimtelijke effect direct na een (half) jaar infiltratie (lichtblauwe lijnen of stippen geven de locaties van infiltratievijvers weer). Rechtsboven staat het verloop van het effect op de grondwaterstand met de tijd en rechtsonder het effect in een doorsnede van de Veluwe, zowel voor eenmalige als continue infiltratie. Bron: De Louw et al., 2020.

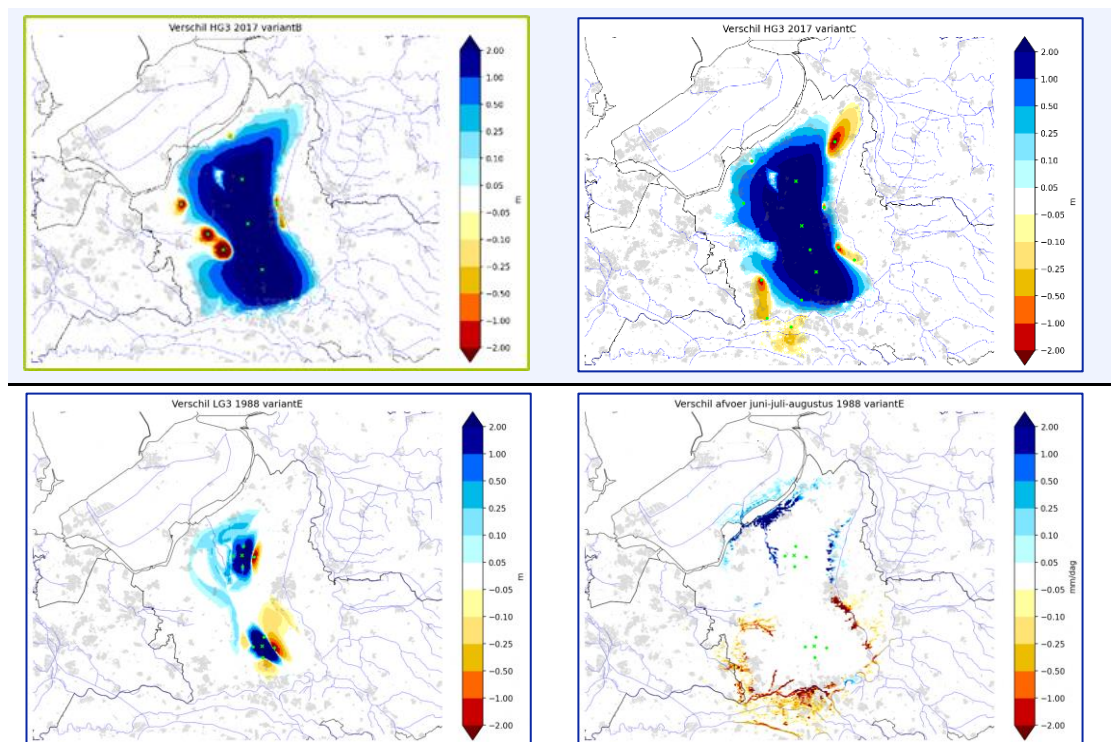
Vitens heeft vervolgens een verkennende studie naar grootschalige infiltratie op de Veluwe door RoyalHaskoning/DHV en Deltares laten uitvoeren waarbij verschillende infiltratie- en terugwinning-scenario's zijn doorgerekend en waarbij ook kosten voor vóórzuivering en transport van rivierwater uit de IJssel in beeld zijn gebracht. Kunstmatige infiltratie van 50, 100 en 200 miljoen m<sup>3</sup> per jaar met terugwinning van 50% van het infiltratievolume zijn doorgerekend. Het idee van twee keer zoveel infiltreren als onttrekken heeft als doel om extra water beschikbaar te maken voor de omgeving in de vorm van hogere grondwaterstanden, hogere afvoer van bronbeken en sprengen en meer kwel.

De infiltratie werd voorzien vanuit 2 of 3 infiltratievijvers van 20 ha met infiltratiesnelheden van 500 mm/dag. Deze grote infiltratiesnelheden zijn mogelijk niet haalbaar waardoor het oppervlak aan infiltratievijvers moet worden vergroot om toch de beoogde infiltratiehoeveelheid te halen.

Er was gekozen om het aantal infiltratievijvers zo klein mogelijk te houden in verband met de kosten voor transport en vóórzuivering.

De belangrijkste bevindingen van deze studie wat betreft geohydrologische haalbaarheid zijn:

- Effecten van de extra onttrekkingen (grondwaterstandsval, afname afvoer en kwel) kunnen in zijn geheel worden gemitigeerd, mits de putten strategisch worden geplaatst (zie Variant E Figuur 4.5);
- Putten dienen zich dan niet verder dan op enkele kilometers afstand rondom de infiltratielocaties te bevinden (Vergelijk variant B en C met E, zie Figuur 4.5);
- Het is verstandig de eerste 3 tot 5 jaar na start kunstmatige infiltratie niet te onttrekken zodat een zoetwatervoorraad kan worden opgebouwd en negatieve effecten in de beginfase kunnen worden voorkomen (zie variant E, Figuur 4.5).
- Grootschalige infiltratie leidt tot flinke stijgingen van de grondwaterstand over een groot gebied door de afwezigheid van ontwatering.
- Deze grondwaterstijgingen reiken tot minimaal de flanken van de Veluwe en kunnen daar lokaal tot wateroverlast leiden in bebouwd gebied waar de grondwaterstand ondieper dan 1.0 m onder maaiveld komt te liggen. Wateroverlast kan lokaal worden verholpen door extra ontwatering en drainage.
- Het concept Wateraccu biedt kansen voor herstel waternatuur in beken en sprengen, de afvoer wordt verhoogd in alle varianten.



Figuur 4.5 Het berekende effect van drie varianten van kunstmatige infiltratie en terugwinning voor 3 varianten: (a) Variant B: 100 miljoen m<sup>3</sup>/jaar infiltratie en 50 miljoen m<sup>3</sup>/jaar terugwinning in 6 nieuwe putten op de flanken van de Veluwe, (b) Variant C: 100 miljoen m<sup>3</sup>/jaar infiltratie en 50 miljoen m<sup>3</sup>/jaar terugwinning in 9 nieuwe putten op de flanken van de Veluwe, (c) Variant E: 200 miljoen m<sup>3</sup>/jaar infiltratie en 100 miljoen m<sup>3</sup>/jaar terugwinning in 8 nieuwe putten op korte afstand van de infiltratievijvers. (d) Variant E: effect op de afvoer.

#### *Aandacht voor kwaliteit infiltratiewater*

Een extra aandachtspunt is de kwaliteit van het te infiltreren water dat altijd een andere samenstelling heeft dan het ontvangende grondwater. Dit kan leiden tot ongewenste verandering van de grondwaterkwaliteit, ook wel aangeduid als vergrijzing van het grondwater ([Vergrijzing van grondwater | STOWA](#), 2022). Dit grondwater komt uiteindelijk ook weer aan het oppervlak in kwelgebieden en bronbeken / sprengen, en kan daar de grondwaterafhankelijke natuur negatief beïnvloeden.

Vergrijzing van het grondwater door kunstmatige infiltratie van water kan worden voorkomen door voorzuivering of het gebruik van schone bronnen (bijv. opgevangen kwelwater). Bij de winningen van Epe en Schalterberg wordt schoon kwelwater uit de Veluwe gebruikt voor infiltratie en is vóórzuivering niet nodig.

De Louw et al. (2020) hebben stroombaanberekeningen gedaan waaruit blijkt dat veruit het meeste van het geïnfiltreerde water naar grote diepte infiltreert (> 100-200 m) en vervolgens richting de Flevopolders stroomt waar het na duizenden jaren uiteindelijk weer opkwelt. Wanneer zorgvuldig de locatie van de infiltratievijvers en onttrekkingen worden gekozen kan de reis van infiltratiewater gunstig worden beïnvloed.

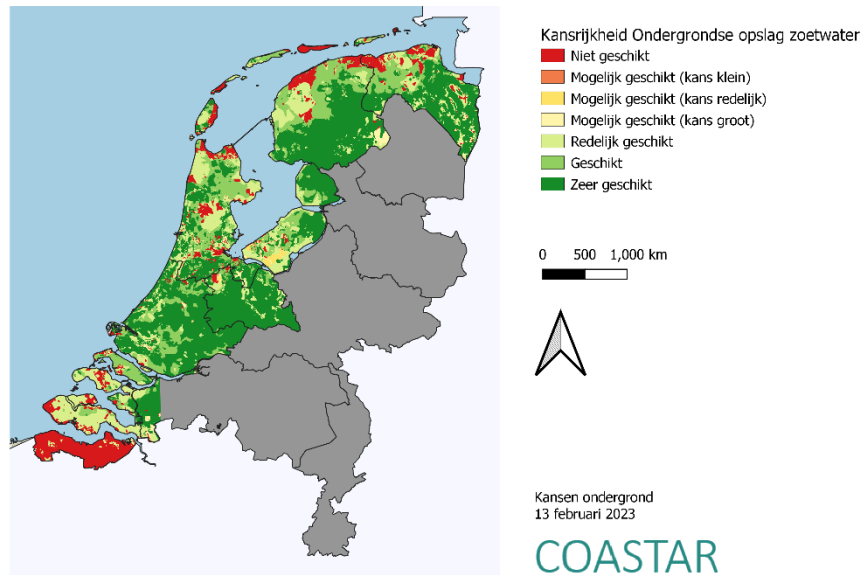
#### **4.2.2 ASR-systemen**

Bij aquifer storage and recovery (ASR) worden zoetwatervoorraden vergroot door extra zoet water te injecteren via grondwaterputten in tijden van overvloed. Bij een tekort aan zoetwater wordt het geïnjecteerde water vaak weer via dezelfde put onttrokken. Het gaat hier niet om het toevoegen van extra grondwater maar het bergen van grondwater met een bepaalde kwaliteit dat het aanwezige grondwater vervangt of wegdrukt, bijvoorbeeld het opslaan van zoet water in een zoute omgeving.

Het COASTAR kennisprogramma biedt mogelijke oplossingen voor de watertransitie, waaronder ASR (Bos-Burgering et al., 2021). Binnen het COASTAR programma hebben experts geohydrologische geschiktheidscriteria vastgesteld, gebaseerd op de veronderstelling dat binnen deze criteria een efficiënt en ecologisch geschikt systeem kan worden ontworpen. De geschiktheid voor ASR is alleen bepaald voor het lage deel van Nederland waar ondiep brak tot zout grondwater kan worden aangetroffen en waar het injecteren van zoet grondwater leidt tot een toename van de zoetwatervoorraad (zoet verdringt brak-zout grondwater).

De geohydrologische geschiktheid van de ondergrond voor de toepassing van ondergrondse opslag van zoet water hangt af van achtergrondstroming, opdrijving, opbarstrisico en doorlatend vermogen. Figuur 4.6 toont de uitkomsten van de geohydrologische geschiktheidskaart voor ASR. Voor ieder van de vier factoren wordt de score van de ondergrond bepaald. De bovenste tabel geeft aan bij welke waarden van factoren welke score hoort. De score geeft aan of de ondergrond ten aanzien van het criterium zeer geschikt (2), mogelijk geschikt (1) of ongeschikt (0) is. Vervolgens wordt de totaalscore, de resulterende beoordeling, over de factoren bepaald conform de onderste tabel.

# Kansrijkheid ondergronds opslag zoetwater



Factor	Criteria	Beoordeling	Duiding		
A. Achtergrondstroming	Vhor < 10 m/j	2	weinig rendementsverlies door afdrijving		
	Vhor 10-20 m/j	1	relatief veel rendementsverlies door afdrijving		
	Vhor > 20m/j	0	groot rendementsverlies door afdrijving		
B. Opdrrijving	Qmin < 500.000 m3/jaar	2	weinig rendementsverlies door opdrrijving; ondergrondse waterberging veilig toepasbaar		
	Qmin = 500.000 m3/jaar tot 2.500.000 m3/jaar	1	relatief veel rendementsverlies door opdrrijving; ondergrondse waterberging mogelijk toepasbaar		
	Qmin > 2.500.000 m3/jaar	0	groot rendementsverlies door opdrrijving; ondergrondse waterberging onwaarschijnlijk		
C. Opbarstrisico	Opbarstindex >1.2	1	relatief sterke deklaag		
	Opbarstindex <= 1.2	0	kwetsbare deklaag		
D. Doorlatend vermogen	kD > 500 m2/d	2	relatief grote infiltratiecapaciteit		
	kD >= 200m2/d	1	matige infiltratiecapaciteit		
	kD < 200 m2/d	0	te kleine infiltratiecapaciteit		
	Doorlatendheid k < 5m/d	0	te kleine infiltratiecapaciteit		
A	B	C	D	Geschiktheid	Duiding
2	2	1	2	zeer geschikt	Optimale omstandigheden
>0	1	1	2	Geschikt	Locatie gevoelig voor opdrrijving + achtergrondstroming
>0	>0	1	1	Matig Geschikt	Locatie gevoelig voor opdrrijving + achtergrondstroming + beperkte transmissiviteit
0	2	1	2	Mogelijk geschikt (kans groot)	Hoge stroomsnelheid, verder optimaal
0	1	1	2	Mogelijk geschikt (kans redelijk)	Hoge stroomsnelheid en gevoelig voor opdrrijving
0	1	1	1	Mogelijk geschikt (kans klein)	Hoge stroomsnelheid en gevoelig voor opdrrijving en beperkte transmissiviteit
A=0	B=0	C=0	D=0	Niet geschikt	Minimaal 1 factor ontoereikend

Figuur 4.6 Geohydrologische geschiktheidskaart voor ondergrondse opslag van zoetwater (ASR); bron Kansrijkheid ondergrondse opslag zoetwater (coastar.nl). De geschiktheid is alleen bepaald voor laag-Nederland (het niet-grijze deel op de kaart) waar brak of zout grondwater ondiep kan worden aangetroffen.

## Ervaringen met ASR-systemen

In de glastuinbouwgebieden Oostland (Zuid-Holland) en Aalsmeer (Noord-Holland) is het opslaan van regenwater in zoete grondwaterpakketten (zoet-in-zoet) sinds de jaren tachtig gebruikelijk. Hieronder staat een overzicht van ervaringen met waterberging in de ondergrond via ASR sinds 1950, gegeven door Zuurbier & Raat (2018).

- Nootdorp: volledig operationeel systeem sinds 2010. Viervoudige verticale put (zodat injectie/terugwinning op verschillende dieptes mogelijk is) (Zuurbier, van Dooren, et al., 2017). Tussen 2011 en 2017 werd ongeveer 53% van het geïnfiltreerde water teruggewonnen. Het maximale terugwinningsrendement is hoger (circa 70%), maar in de praktijk heeft de tuinder minder water nodig.
- Breezand (Noord-Holland, zandgrond): 2014 – 2020. Drainagewater van 10 ha wordt opgevangen om in de ondergrond te infiltreren. Volgens modelberekeningen zou een terugwinningsrendement van 60% gehaald kunnen worden (Spaarwater: (Oord et al., 2019)).

- Ondergrondse berging – Borgsweer (2015-2018) ondergrondse berging in combinatie met druppelirrigatie (Spaarwater: (Oord et al., 2019)).
- Dinteloord: volledig operationeel systeem sinds 2018. Jaarlijkse opslagcapaciteit van 300.000 m<sup>3</sup> extra gezuiverd effluent van Suiker Unie. Het systeem bestaat uit 8 ASR-putten, per twee gegroepeerd, waardoor 4 zoetwaterbellen ontstaan. Herstelefficiëntie ca. 80% (Zuurbier, Janmaat, et al., 2017; Zuurbier, Stuyfzand, et al., 2017)
- Urban Waterbuffer Spangen: operationeel systeem sinds 2018. Regenwater uit voetbalstadion Sparta wordt opgevangen, voor behandeld en ondergronds opgeslagen voor later hergebruik in tijden van watervraag. Tot nu toe is ongeveer 30.000 m<sup>3</sup> regenwater opgeslagen. Het terugwinningsrendement wordt geschat op zo'n 70%, maar lag in de praktijk lager door verkeerd beheer.
- Drainstore, Zuid-Beveland. Sinds 2020 in gebruik bij biodynamisch akkerbouwbedrijf Meulwaeter. Op een landbouwperceel van circa 25 hectare wordt via samengestelde drainage drainagewater opgevangen, voor-behandeld en via drie verticale putten ondergronds opgeslagen in een bestaande zoetwaterlens. Tijdens het groeiseizoen kan het opgeslagen water worden teruggewonnen met 9 ondiepe verticale onttrekkingsputten en terugstromen naar de drains, zodat gewassen van onderaf kunnen worden geïrrigeerd.

## 4.3 Methode

Om inzicht te krijgen in de potentie van grootschalige kunstmatige infiltratie (MAR-systemen) zijn een aantal scenario's doorgerekend met het Landelijk Hydrologische Model (LHM) versie 4.2 (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Overzicht modelvarianten Grootschalige kunstmatige infiltratie

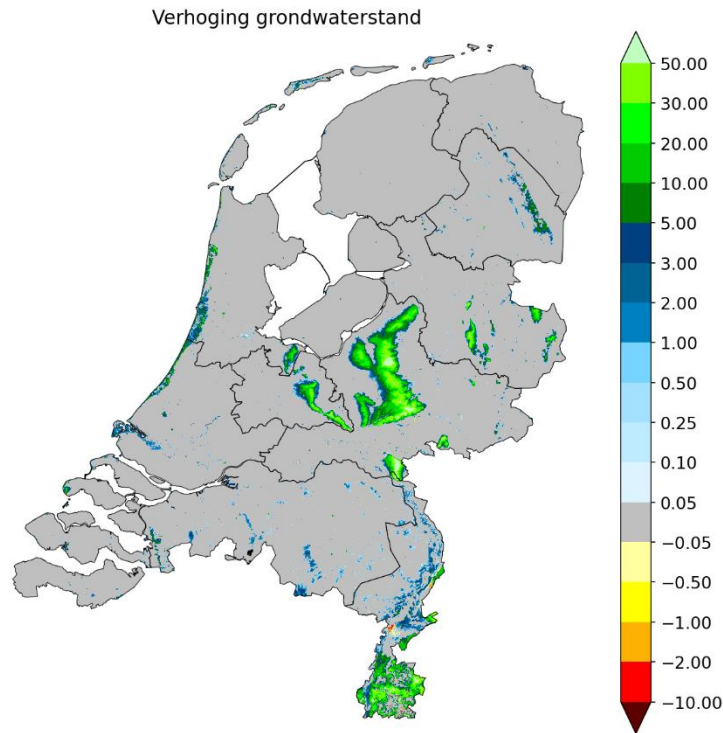
Scenario	Toelichting	Toelichting uitgebreid
Ref	Referentie	
S1	Maximale watervasthoudend vermogen van de ondergrond.	Voor gebieden met GHG > 2.5 m-mv wordt de grondwaterstand verhoogd tot 2.5 m-mv (startconditie). Vervolgens wordt 30 jaar doorgerekend en per jaar bepaald hoeveel van het extra volume (GW-stand) nog steeds aanwezig is en hoeveel is verdwenen.
S2A	Infiltratie gehele jaar	Voor gebieden met GHG > 2.5 m-mv wordt drie jaar elke dag geïnfiltrated volgens onderstaand infiltratieregim, en vervolgens 27 jaar niet.
S2B	Infiltratie winter	Als S2A alleen wordt de hoeveelheid gedurende het winterhalfjaar geïnfiltrated.
S3A	Infiltratie + onttrekking gehele jaar	Als 2A maar dan 30 jaar lang, en na 3 jaar wordt er elke dag de helft van infiltratiehoeveelheid onttrokken.
S3B	Infiltratie winter + onttrekking zomer	Als 2B maar dan 30 jaar lang, en na 3 jaar wordt er elk zomerhalfjaar de helft van infiltratiehoeveelheid onttrokken.
S4A	Infiltratie + onttrekking gehele jaar	Als 2A maar dan 30 jaar lang, en na 3 jaar wordt er elke dag net zo veel als de infiltratiehoeveelheid onttrokken.
	Infiltratieregim klein, gehele jaar	GHG tussen 2.5 en 10 m-mv: 0.5 miljoen m <sup>3</sup> per jaar, 21.9 mm/dag
	Infiltratieregim klein, winter halfjaar	GHG tussen 2.5 en 10 m-mv: 0.5 miljoen m <sup>3</sup> per jaar, 43.8 mm/dag
	Infiltratieregim groot, gehele jaar	GHG dieper dan 10 m-mv: 1.0 miljoen m <sup>3</sup> per jaar, 43.8 mm/dag
	Infiltratieregim groot, winter halfjaar	GHG dieper dan 10 m-mv: 1.0 miljoen m <sup>3</sup> per jaar, 87.6 mm/dag

### Scenario S1 (watervasthoudend vermogen)

Allereerst is het watervasthoudend vermogen van de ondergrond bepaald (S1) door de grondwaterstand te verhogen in gebieden met een GHG dieper dan 2.5 meter onder maaiveld, tot 2.5 meter onder maaiveld (modellaag 1 in LHM; Figuur 4.7). In de diepere modellagen is de stijghoogte respectievelijk verhoogd zodat het verschil tussen de stijghoogte en freatische grondwaterstand hetzelfde blijft. Dit kan leiden tot enige onnauwkeurigheden in de beginfase van de simulatie, omdat de stijghoogte verschillen tussen de modellagen wellicht niet passen bij de nieuwe start conditie (GHG van 2.5 m-mv).

Er is gekozen om grootschalige infiltratie toe te passen voor gebieden met een grondwaterstand dieper dan 2.5 m-mv om nog ruimte boven de grondwaterstand beschikbaar te hebben om extra grondwater te bergen door infiltratie. Door per jaar te analyseren hoeveel van het extra volume (grondwaterstand) is verdwenen kan bepaald worden wat het maximaal watervasthoudende vermogen van de ondergrond is. Immers, het extra grondwater lekt weg naar de omgeving, afhankelijk van de doorlatendheid en ontwateringsdichtheid. In de analyses

van de modelresultaten wordt het zuiden van Limburg gemaskeerd omdat het LHM niet goed in staat is infiltratie en onttrekkingsprocessen in het kalksteengebied te simuleren. Z-Limburg wordt wel meegenomen in het formuleren van de scenario's om een indruk te krijgen hoeveel water hier kan worden opgeslagen.



*Figuur 4.7 Grondwaterstandsverhoging [m] wanneer grondwater verhoogd wordt in gebieden met een GHG dieper dan 2.5 meter onder maaiveld, tot 2.5 meter onder maaiveld.*

#### *Infiltratie -en onttrekkingsscenario's (S2 t/m S4)*

De potentie van grootschalige kunstmatige infiltratie wordt onderzocht door infiltratieplassen modelmatig te simuleren in gebieden met een GHG dieper dan 2.5 meter onder maaiveld.

De grootte van de infiltratie-eenheden, -plassen, en -debieten en onttrekkingsdebieten zijn gekozen op basis van eerdere modelverkenningen voor grootschalige infiltratie op de Veluwe (De Louw et al., 2020 en de studie van RoyalHaskoning-DHV en Deltares voor Vitens) en de droogtestudie hoge zandgronden (Van den Eertwegh et al., 2021, De Louw et al., 2022).

De infiltratieplassen worden gesimuleerd binnen een infiltratie eenheid van 2.5km bij 2.5km waarbij de infiltratieplas een oppervlak heeft van 250m bij 250m (1 modelcel) en in het midden van een infiltratie-eenheid is geplaatst (zie Figuur 4.8). Infiltratie wordt gesimuleerd als extra aanvulling aan maaiveld in Metaswap waardoor de percolatie (en vertraging) door de onverzadigde zone wordt meegenomen.

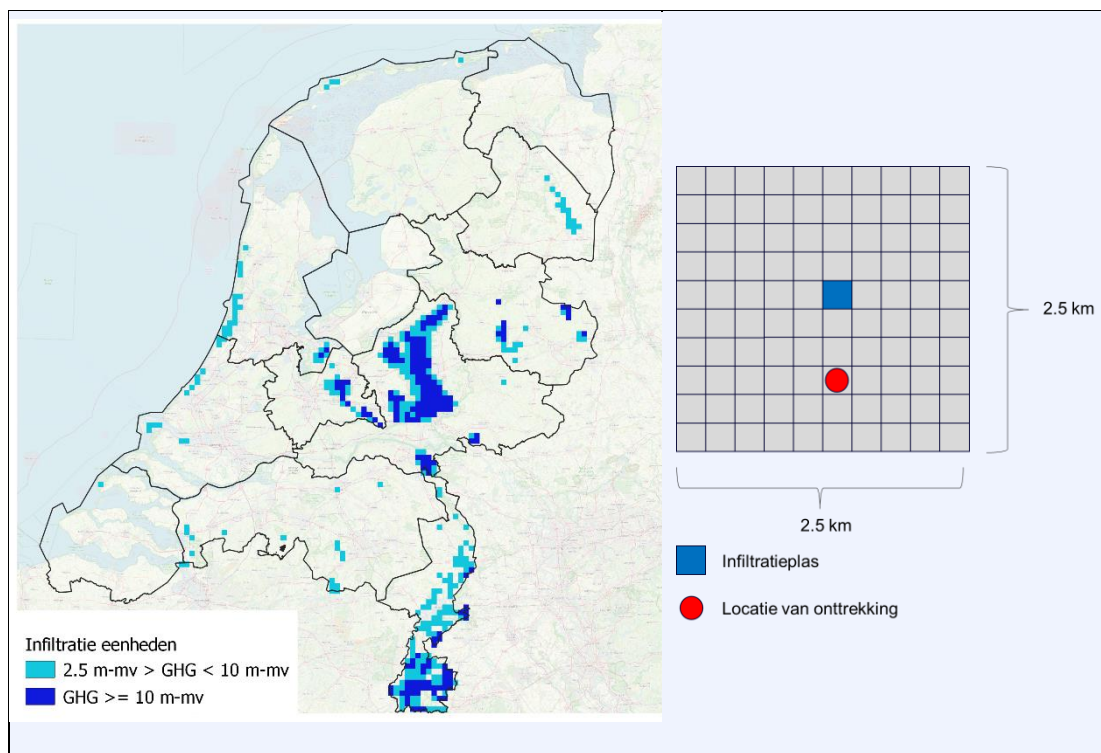
In scenario S2A en S2B wordt er 3 jaar lang water geïnfiltrerd, en vervolgens 27 jaar niet (Tabel 4.1). De infiltratie eenheden die een GHG hebben dieper dan 10 meter onder maaiveld infiltreren 1.0 miljoen m<sup>3</sup> per jaar in de infiltratieplas, met een infiltratiesnelheid van 43.8 mm per dag. De infiltratie eenheden met een GHG tussen de 10 en 2.5 meter onder maaiveld, infiltreren 0.5 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, met een infiltratiesnelheid van 21.9 mm per dag. Voor deze ondiepere grondwaterstanden wordt een kleinere infiltratiehoeveelheid gehanteerd omdat de ruimte om grondwater te bergen ook kleiner is en er anders sneller kans op wateroverlast (hoge grondwaterstanden) kan ontstaan. Er is dus onderscheid gemaakt in grote en kleine infiltratie



eenheden op basis van de GHG. In totaal wordt er op deze manier jaarlijks 325 miljoen m<sup>3</sup> water geïnfiltreerd, waarvan 153.5 miljoen m<sup>3</sup> in de Veluwe (Tabel 4.2).

In scenario S2A wordt elke dag water geïnfiltreerd en in scenario S2B alleen in het winterhalfjaar (oktober tot en met maart), waardoor het infiltratiedebiet per dag verdubbelt is in variant S2B ten opzichte van S2A.

In S3-scenario's worden grondwateronttrekkingen toegevoegd. De infiltratieregimes uit het S2-scenario worden aangehouden voor 30 jaar en vanaf het 4<sup>de</sup> jaar wordt de helft van de jaarlijkse infiltratiehoeveelheid jaarlijks onttrokken. Hierbij is onderscheid in onttrekken gedurende het gehele jaar (S3A) en alleen in het zomerhalfjaar dat loopt van april tot en met september (S3B). De putten worden in de 3<sup>de</sup> modelcel onder de infiltratieplas geplaatst (Figuur 4.8), op een diepte die overeenkomt met de diepte van de grootste winput op dichtstbijzijnde bestaande winningslocatie. Jaarlijks wordt er dan 162.5 miljoen m<sup>3</sup> water onttrokken, waarvan 76.75 miljoen m<sup>3</sup> op de Veluwe (Tabel 4.2).



Figuur 4.8 Illustratie van infiltratie eenheid en infiltratieplas (rechts) en de infiltratie eenheid gebieden met een mediane GHG dieper dan 2.5 of 10.0 meter onder maaiveld (links).

Tabel 4.2 Overzicht van aantal putten en infiltratie- en onttrekkingsdebieten (miljoen m<sup>3</sup>/jaar).

	Aantal putten			Infiltratie debiet (miljoen m <sup>3</sup> /jaar)	Onttrekkingsdebiet (miljoen m <sup>3</sup> /jaar)
	Groot	Klein	Totaal		
<b>Nederland</b>	188	274	462	325.0	162.5
<b>Nederland zonder Zuid-Limburg</b>	160	243	403	281.5	140.75
<b>Veluwe</b>	112	83	195	153.5	76.75

## 4.4 Resultaten MAR-systemen

### 4.4.1 Watervasthoudend vermogen van de ondergrond (scenario S1)

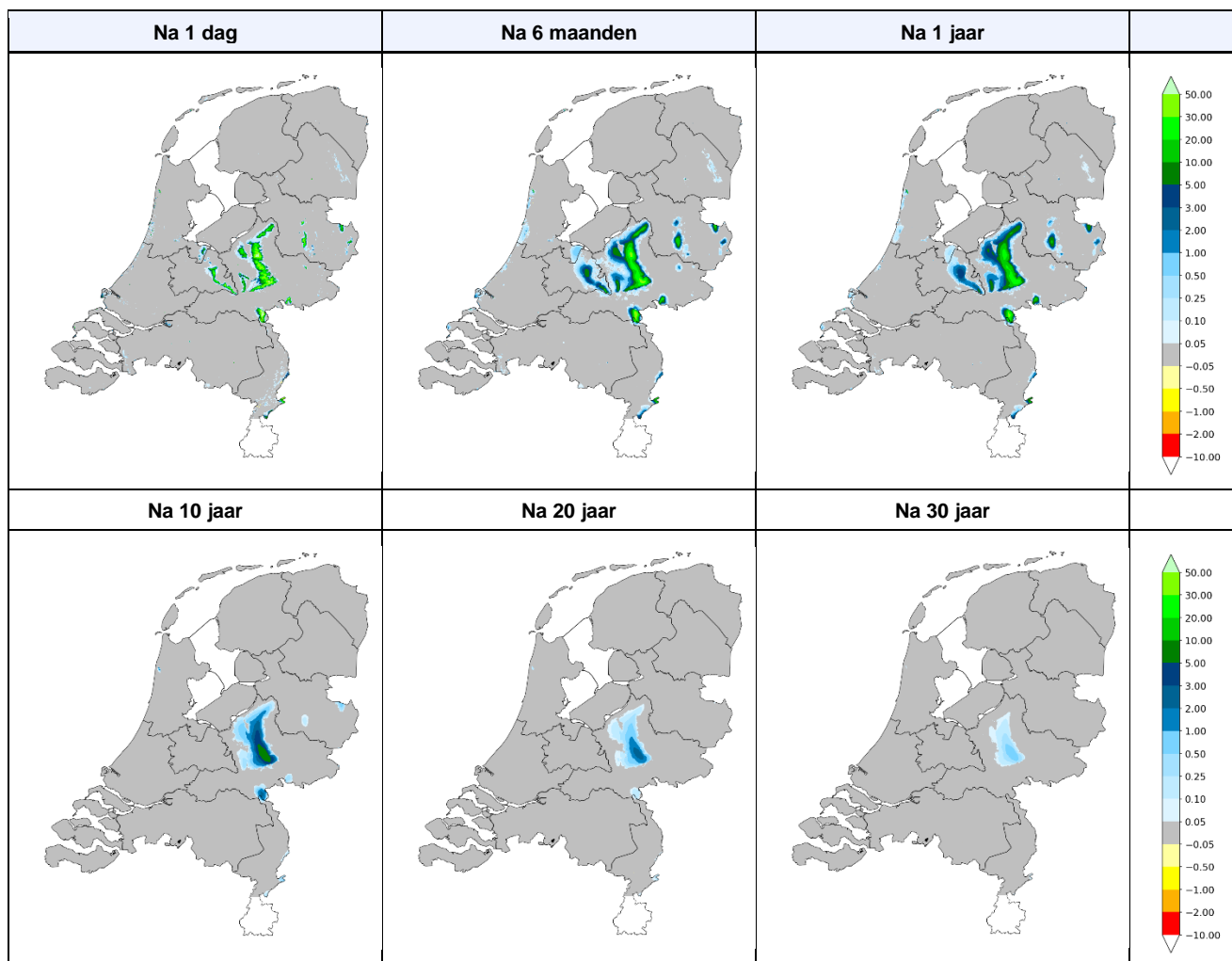
Door de grondwaterstand te verhogen in gebieden met een GHG dieper dan 2.5 meter onder maaiveld, tot 2.5 meter onder maaiveld, kan er een volume van ongeveer 3900 miljoen m<sup>3</sup> water worden opgeslagen in de ondergrond (bij een porositeit van 0.30). Uiteraard is dit geen realistische situatie en ook zal direct de grondwaterstand beginnen te dalen door ontwatering in de omgeving. Hoe snel dit gebeurt, is sterk afhankelijk van de ontwaterings situatie in de omgeving en de opbouw en doorlatendheid van de ondergrond en kan worden gezien als maat voor het vermogen om water vast te houden. Het is dan ook het doel van dit scenario om dit in beeld te brengen.

In het eerste jaar na verhoging van de grondwaterstand wordt het areaal met een verhoogde grondwaterstand bijna twee keer zo groot door uitstralingseffecten (zie Figuur 4.9). Het grondwater dijt als het ware uit. De verhoogde grondwaterstand zorgt voor grotere gradiënten en grondwater stroomt daardoor richting de gebieden met een lagere grondwaterstand. De verhoogde grondwaterstand is duidelijk nog niet in evenwicht met de omgeving. Na het eerste jaar neemt het beïnvloede areaal lineair af (Figuur 4.11). Seizoensinvloeden blijven zichtbaar. In de zomerperiode neemt het areaal in het begin iets toe omdat de grondwaterstand dan voor een groot deel onder de ontwateringsbasis ligt, ofwel de sloten vallen droog, en wordt de uitdijning van het grondwater niet belemmert door ontwatering.

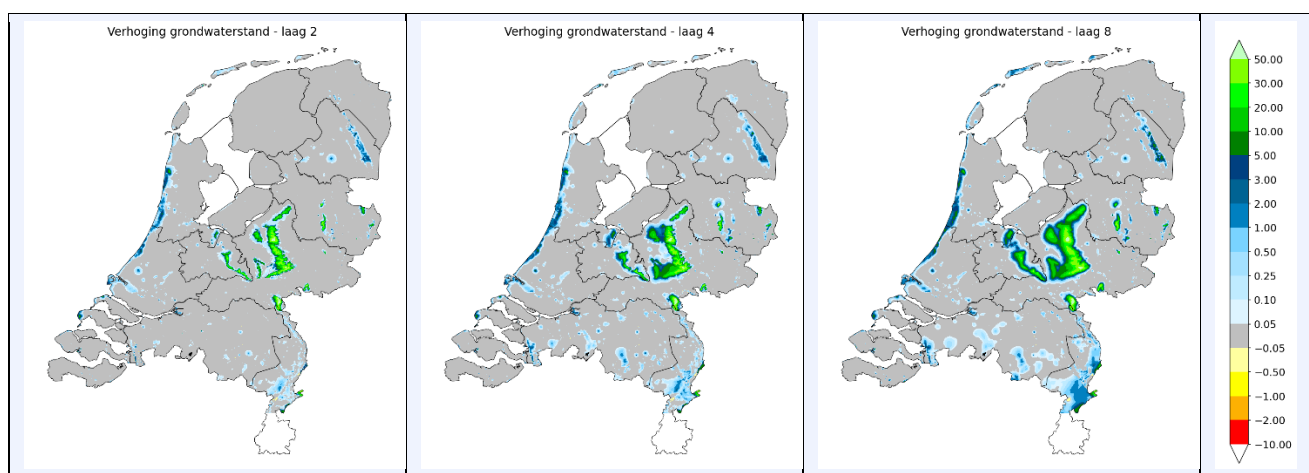
Het volume extra geborgen grondwater neemt met een exponentieel karakter af, net zoals een badkuip steeds minder snel leeg loopt, omdat de waterdruk (lees grondwaterstand) ten opzichte van de ontwatering steeds kleiner wordt. Het dalen van de grondwaterstand wordt voornamelijk bepaald door ontwatering door beken, sloten en drainagebuizen (en vervolgens afvoer). In het eerste jaar neemt de afvoer met meer dan 500 miljoen kuub toe (Figuur 4.12). Ook veranderen veel infiltratiegebieden naar kwelgebieden in het eerste jaar (Figuur 4.13). Dit effect is na 3 jaar nauwelijks meer zichtbaar. Tevens kunnen planten gebruik maken van de stijgende grondwaterstanden en hierdoor meer verdampen (Tabel 4.3).

Na drie jaar is de extra grondwatervoorraad van 3900 miljoen m<sup>3</sup> gehalveerd, en na zeven jaar is er nog maar een kwart van over, voornamelijk rondom de Veluwe (Figuur 4.11 en Figuur 4.14). De seizoensinvloeden werken door in het beïnvloede areaal maar niet in het totale volume. Dit komt omdat er door halfjaarlijkse infiltratie het beïnvloed gebied uitdijt waardoor het geïnfiltreerde water zich verplaatst maar het grondwatervoorraad hierdoor niet afneemt. De afname van de grondwatervoorraad neemt gestaag af zonder seizoensinvloeden. De seizoensinvloeden op het beïnvloede areaal worden kleiner naarmate de grondwaterstanden dalen en er minder water wordt vastgehouden.

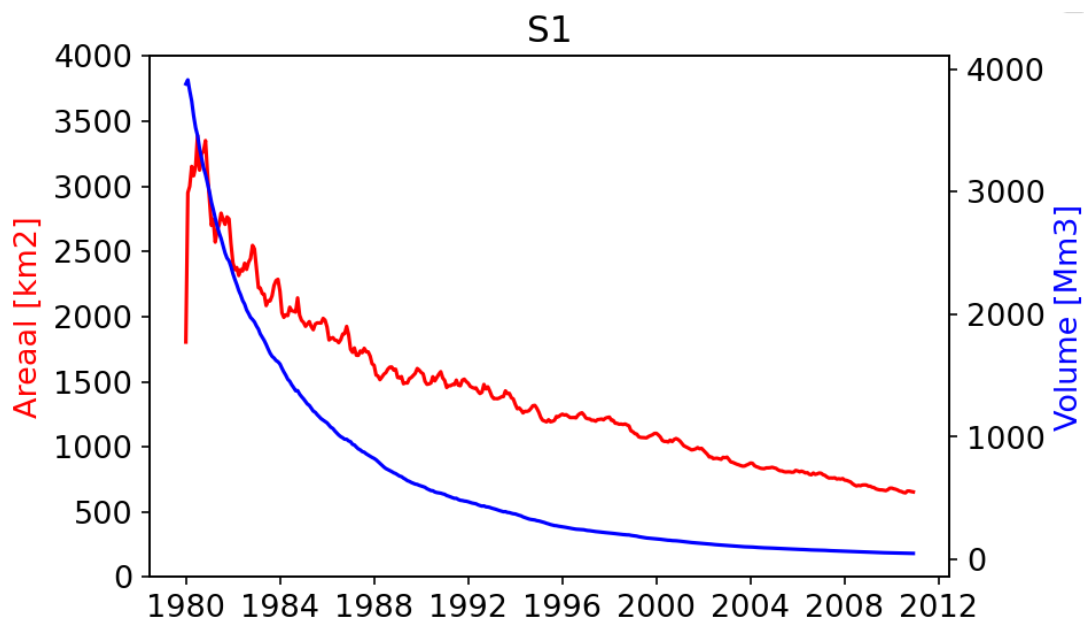
Wat opvalt in Figuur 4.9 is dat na de eerste dag er voor veel gebieden waar de grondwaterstand is verhoogd geen effecten meer terug te zien zijn (vergelijk met de beginconditie uit Figuur 4.7). Dit geldt voor de wat kleinere infiltratiegebieden, bijvoorbeeld in Noord-Brabant. Dat de verhoging niet terug is te zien in de freatische grondwaterstand, is een modelartefact. Modelmatig is de beginconditie verhoogd in modellaag 1 van GHG maar 2.5 m-mv. De stijghoogte in de onderliggende modellagen zijn aangepast op basis van het verschil tussen de GHG in modellaag 1 en de betreffende modellaag. Blijkbaar vindt er versnelde grondwaterstroming plaats van modellaag 1 naar dieper pakketten waardoor de kleinere gebieden verdwijnen door een niet correcte beginconditie voor de diepere modellagen. In werkelijkheid zullen de ondiepe grondwaterstanden niet binnen één dag gedaald zijn. In kleinere gebieden waar de grondwaterstand is verhoogd, zoals in de provincie Noord-Brabant, is de verhoogde grondwaterstandsverhoging wel terug te zien in de verhoogde stijghoogtes in diepere LHM lagen (Figuur 4.10).



*Figuur 4.9 Verhoging van grondwaterstanden (m) door grondwaterstandsverhoging in startconditie naar 2.5 m-mv, voor gebieden met GHG > 2.5 m-mv (S1).*



*Figuur 4.10 Verhoging van stijghoogte na 1 dag in LHM laag 2, 4 en 8 (m) door grondwaterstandsverhoging in startconditie naar 2.5 m-mv, voor gebieden met GHG > 2.5 m-mv (S1).*

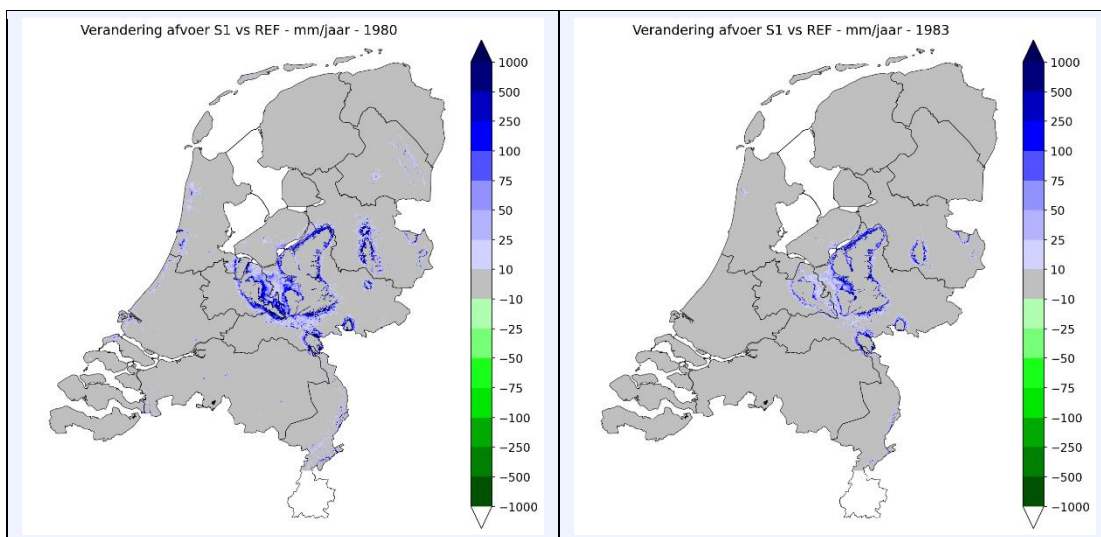


Figuur 4.11 Volume extra geborgen grondwater (miljoen m<sup>3</sup>) en beïnvloed areaal, over tijd. NB: De hoeveelheid geborgen grondwater is hier berekend als grondwaterstandsverhoging vermenigvuldigd met oppervlak en een porositeit van 0.3. Dit zijn andere getallen dan berekend in de waterbalans door Modflow zoals in onderstaande tabel.

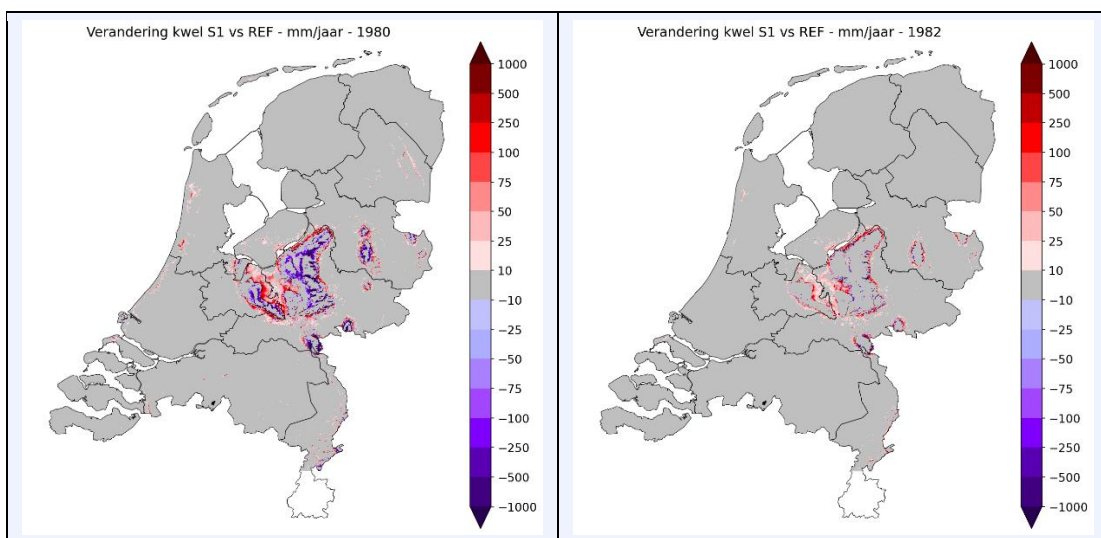
Tabel 4.3 Verandering in fluxen [miljoen m<sup>3</sup>/jaar] als gevolg van grondwaterstandsverhoging in startconditie naar 2.5 m-mv, voor gebieden met GHG > 2.5 m-mv (S1).

	Afvoer <sup>1</sup>	ETact <sup>1</sup>	Runoff <sup>1</sup>	Kwel/Infiltratie <sup>2</sup>	Storage <sup>1</sup>
1980	598	10	231	20	3753
1981	409	9	105	25	498
1982	256	16	38	27	325
1983	219	8	33	8	242
1984	183	4	28	3	204
1985	133	1	12	2	150
1986	107	5	12	1	119
1987	97	0	11	1	101
1988	83	2	11	0	98
1989	58	3	5	0	71

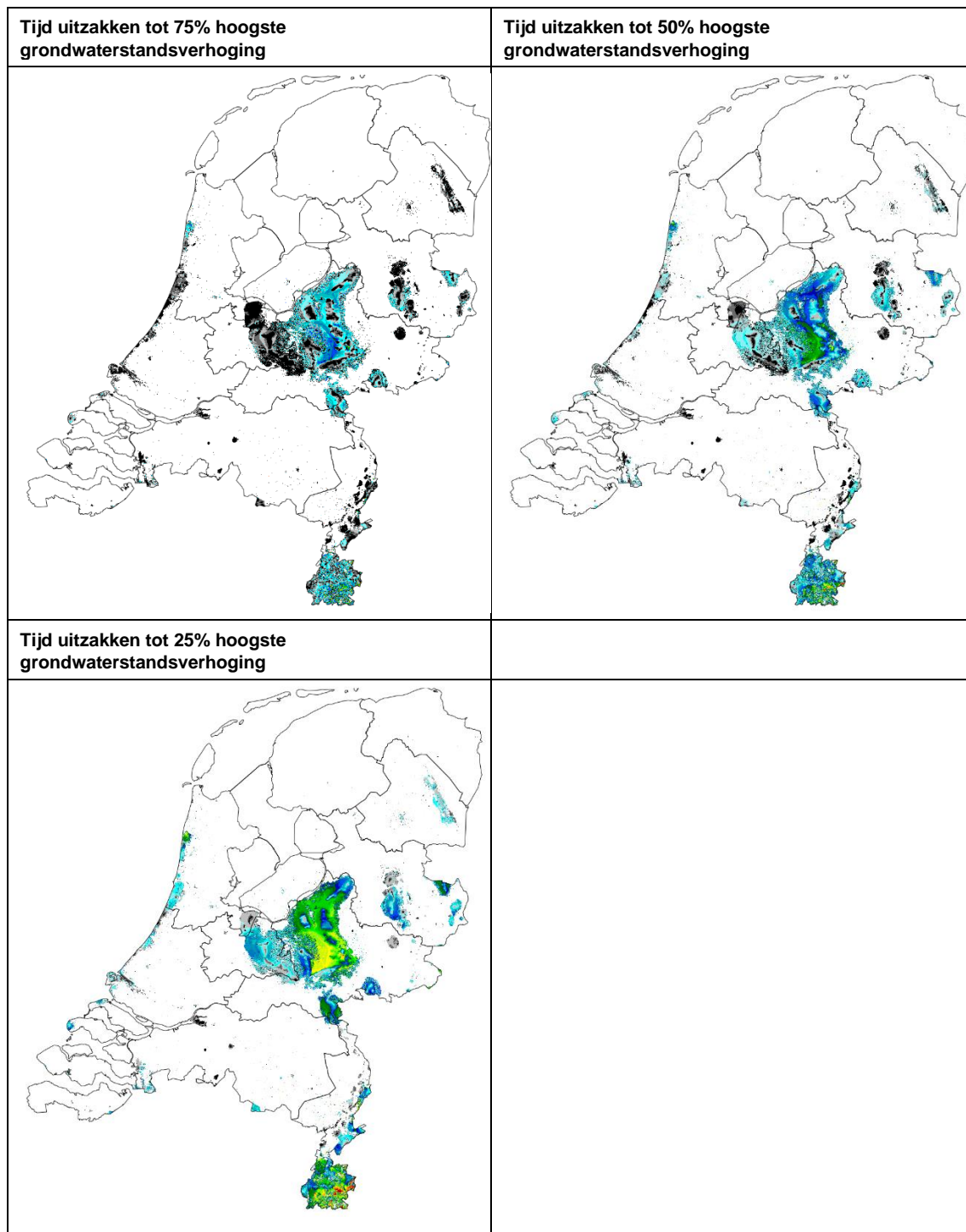
1: positief = toename in uitgaande flux  
2: positief = toename kwelflux & afname infiltratieflux, negatief = afname in kwelflux & toename infiltratieflux



Figuur 4.12 Verandering van totale afvoer in mm/jaar (rivier- en drainagesystemen) als gevolg van grondwaterstandsverhoging in startconditie naar 2.5 m-mv, voor gebieden met GHG > 2.5 m-mv (S1). Blauwe kleuren tonen een toename in afvoer en groene kleuren een afname.



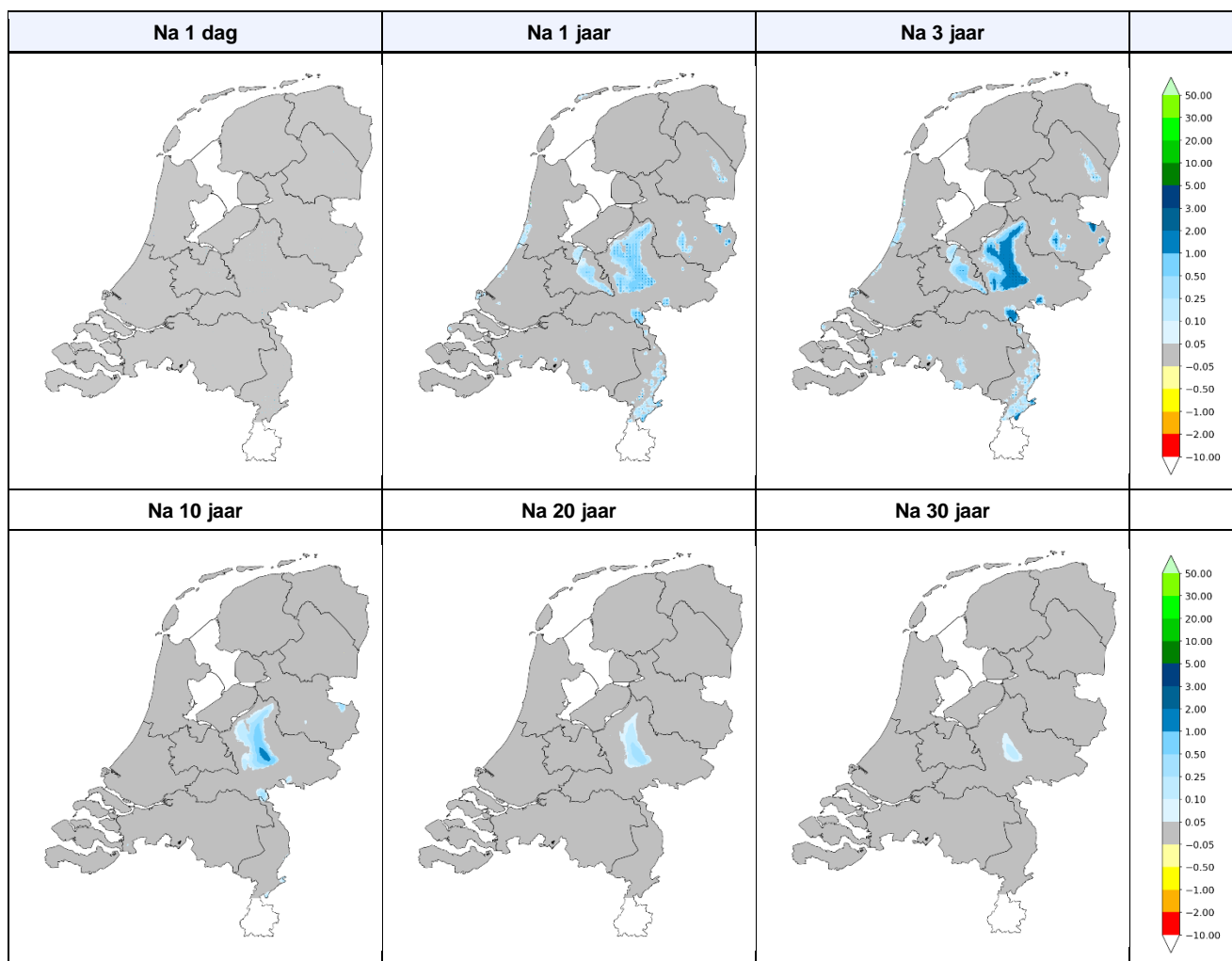
Figuur 4.13 Verandering van kwelflux in mm/jaar als gevolg van grondwaterstandsverhoging in startconditie naar 2.5 m-mv, voor gebieden met GHG > 2.5 m-mv (S1). Rode kleuren tonen een toename in huidige kwelflux en paarse kleuren tonen de kwelflux in de scenario situatie (S1) waar in de referentie een infiltratiegebied aanwezig was maar door de verhoogde grondwaterstand veranderend is naar een kwelgebied.



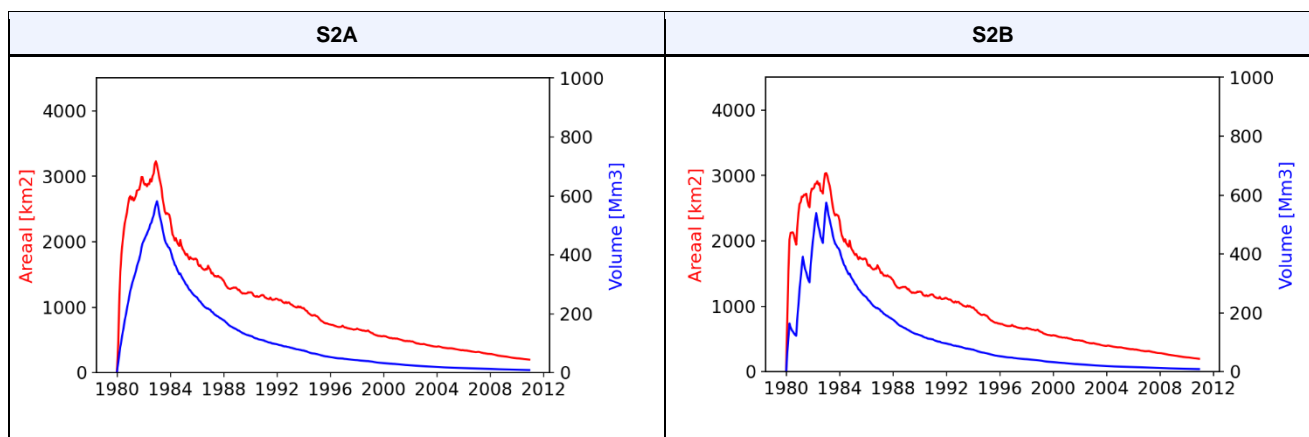
Figuur 4.14 Tijd uitzakken van hoogste grondwaterstandsverhoging tot 75% (linksboven), 50% (rechtsboven) en 25% (linksonder) verhoging resterend is.

#### 4.4.2 Infiltratieplassen (scenario S2A en S2B)

De potentie van grootschalige kunstmatige infiltratie is onderzocht door in drie jaar tijd 845 miljoen m<sup>3</sup> te infiltreren (282 miljoen m<sup>3</sup> per jaar) door middel van infiltratieplassen (zie paragraaf 4.3). Na drie jaar is er 385 miljoen m<sup>3</sup> grondwater opgeslagen in de ondergrond, onder een oppervlak van iets meer dan 3200 km<sup>2</sup> (som van de negatieve storage waarden in Tabel 4.4, Figuur 4.15 en Figuur 4.16). De overige hoeveelheid van 460 miljoen m<sup>3</sup> (= 845 – 385) wordt meteen gedurende de drie infiltratiejaren afgevoerd (inclusief surface runoff) en deels meer verdamping. Er is ook een deel van het infiltratiewater dat in de onverzadigde zone is opgeslagen (is niet in de tabel opgenomen). In de eerste drie jaar nemen de uitgaande fluxen dus flink toe (rivier, drainage, kwel, run-off en verdamping; Tabel 4.4). In Figuur 4.17 is te zien dat in de eerste drie jaar water wordt opgeslagen als grondwater (negatieve storage flux). Wanneer er geen water meer wordt geïnfiltreerd, vanaf 1983, neemt de hoeveelheid opgeslagen water in de ondergrond af (positieve storage flux), ongeveer gelijk aan de som van uitgaande termen afvoer, runoff en verdamping. Deze uitgaande termen nemen met de tijd ook af omdat het grondwatersysteem steeds verder leegloopt (als een badkuip). Dit is goed te zien in de tijdreeksen van deze uitgaande termen (zie Figuur 4.17). Na 10 jaar is de opgeslagen hoeveelheid grondwater dat in de eerste drie jaar is geïnfiltreerd nog steeds niet helemaal verdwenen en is dit nog ongeveer 80 miljoen m<sup>3</sup> waarvan jaarlijks ongeveer 15 miljoen m<sup>3</sup> het systeem verlaat. Na 10 jaar bevat vrijwel alleen de Veluwe en enkele heuvelruggen in oosten nog een opgeslagen grondwatervoorraad. Voor alle overige gebieden is de in 3 jaar opgebouwde voorraad dan afgevoerd.



Figuur 4.15 Verhoging van grondwaterstanden (m) bij 3 jaar infiltratie (S2A).

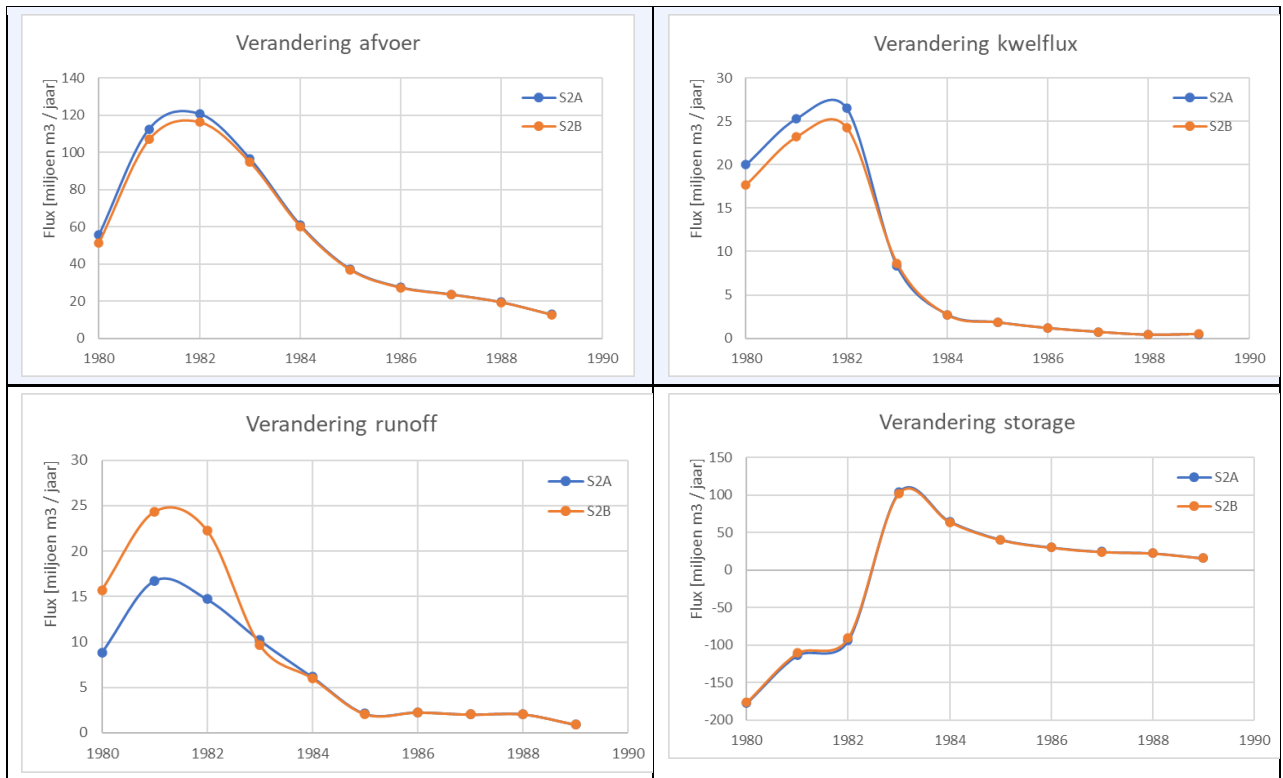


Figuur 4.16 De verandering van het volume aan geborgen grondwater in de tijd door 3 jaar infiltratie (start in 1980) en het vervolgens laten uitzakken van de grondwaterstand vanaf 1983 (uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup>) en het beïnvloed areaal bij 3 jaar dagelijkse infiltratie (S2A: links) en 3 jaar dagelijkse infiltratie in de wintermaanden (S2B: rechts), over tijd. NB: De hoeveelheid geborgen grondwater is hier berekend als grondwaterstandsverhoging vermenigvuldigd met oppervlak en een porositeit van 0.3. Dit zijn andere getallen dan berekend in de waterbalans door Modflow zoals in onderstaande tabel.

Tabel 4.4 Verandering in fluxen [miljoen m<sup>3</sup>/jaar] door 3 jaar infiltratie (start in 1980) en het vervolgens laten uitzakken van de grondwaterstand vanaf 1983 (S2A).

	Afvoer <sup>1</sup>	ETact <sup>1</sup>	Runoff <sup>1</sup>	Kwel/Infiltratie <sup>2</sup>	Storage <sup>1</sup>	Infiltratie
<b>1980</b>	56	1	9	20	-177	282
<b>1981</b>	113	2	17	25	-114	282
<b>1982</b>	120	8	15	27	-94	282
<b>1983</b>	97	4	10	8	103	0
<b>1984</b>	61	1	6	3	65	0
<b>1985</b>	37	0	2	2	41	0
<b>1986</b>	28	1	2	1	30	0
<b>1987</b>	24	0	2	1	24	0
<b>1988</b>	20	0	2	0	22	0
<b>1989</b>	13	1	1	0	16	0
1: positief = toename in uitgaande flux						
2: positief = toename kwelflux & afname infiltratieflux, negatief = afname in kwelflux & toename infiltratieflux						



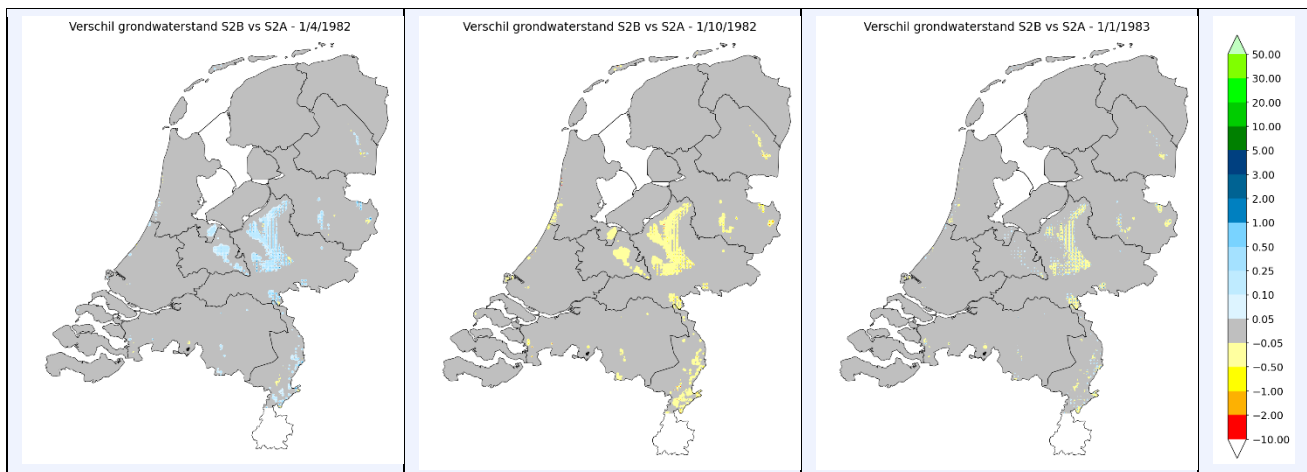


Figuur 4.17 Verandering in jaarlijkse fluxen [miljoen m<sup>3</sup>/jaar] door 3 jaar infiltratie (start in 1980) en het vervolgens laten uitzakken van de grondwaterstand vanaf 1983 (uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup>) bij 3 jaar dagelijkse infiltratie (S2A) en 3 jaar dagelijkse infiltratie in de wintermaanden (S2B), over tijd.

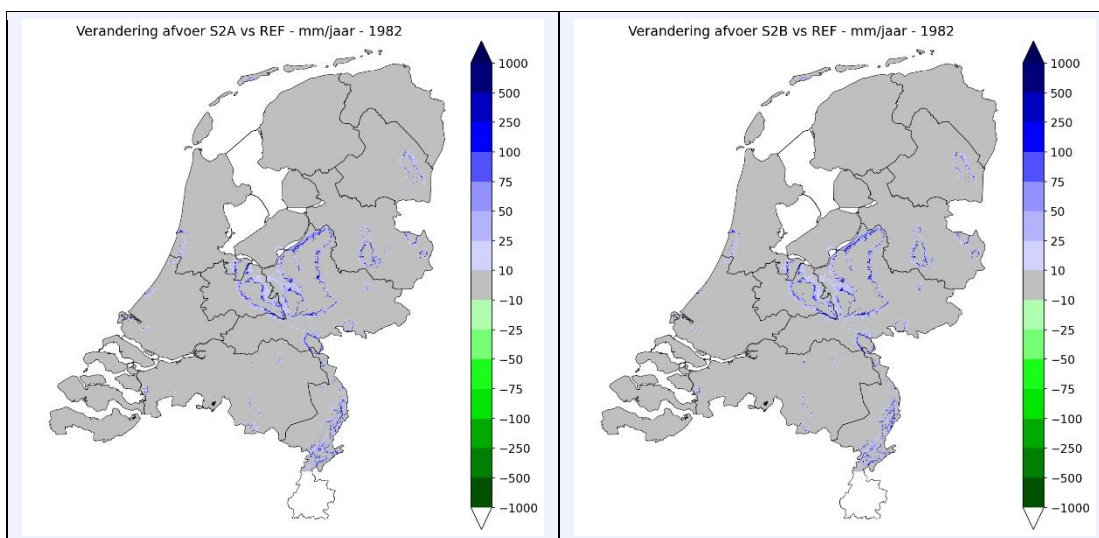
Wanneer dezelfde hoeveelheid water alleen in de wintermaanden wordt geïnfiltreerd wordt er dezelfde orde grootte water in de ondergrond opgeslagen (variant 2B; 385 miljoen m<sup>3</sup>). Het temporeel stoppen van de infiltratie is goed terug te zien in de drie haaiantandvormige dalingen van het opgeslagen volume (Figuur 4.16). De temporele afname wordt groter naarmate er meer water in de ondergrond is opgeslagen. Dit komt doordat met name de afvoer van grondwater (door sloten en beken toeneemt) bij een stijging van de grondwaterstanden. Dit is ook terug te zien in het verloop van de grondwaterstanden. Aan het eind van de winter staan de grondwaterstanden in variant S2B ongeveer 5 tot 10 centimeter hoger dan in variant S2A en aan het eind van de zomer 5 tot 10 centimeter lager (Figuur 4.18).

Doordat het totale volume dat wordt geïnfiltreerd even groot is als in variant 2A en de seizoensinvloeden nauwelijks een rol spelen is er na drie jaar dezelfde hoeveelheid water opgeslagen. Na drie jaar, wanneer er geen infiltratie meer plaatsvindt, neemt het beïnvloede areaal en het volume van het geïnfiltreerde water af met een exponentieel karakter net zoals we zagen bij scenario S1. Na tweeënhalf jaar is de geborgen hoeveelheid grondwater van 385 miljoen m<sup>3</sup> gehalveerd, en na zes jaar is er nog een kwart over (Figuur 4.16 en Tabel 4.4). Dit komt redelijk overeen met exponentiele afname die te zien was in variant S1, waarbij het volume gehalveerd was in drie jaar en er na zeven jaar nog maar een kwart over was.

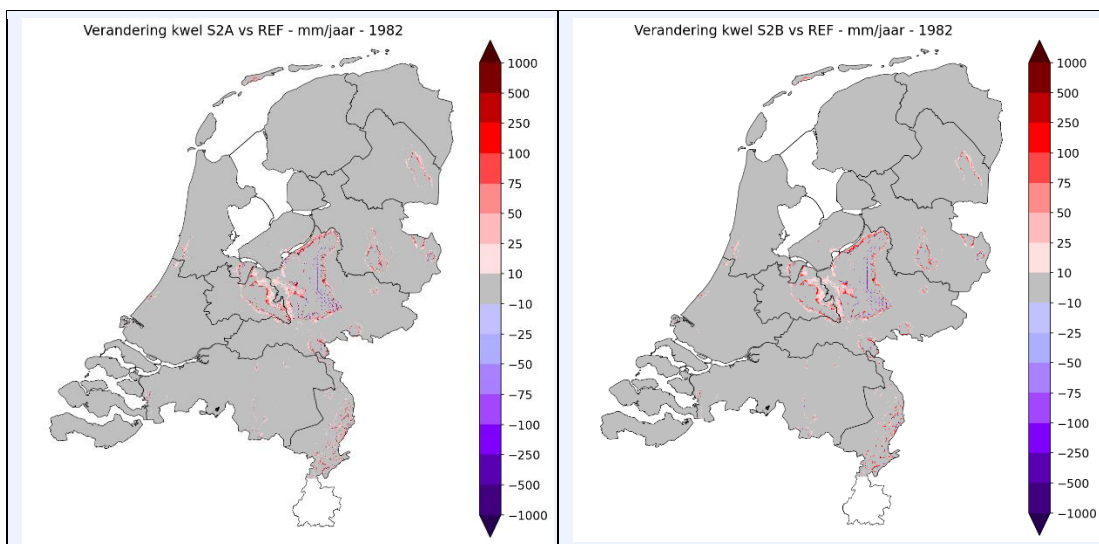
De afvoer en de kwel nemen dus significant toe in gebieden rondom de infiltratieplassen als gevolg van de drie jaar lange infiltratie. Dit is ruimtelijk weergegeven in Figuur 4.19 en Figuur 4.20.



Figuur 4.18 Vershil in grondwaterstanden (m) in 1982, het laatste jaar van infiltreren, tussen scenario S2B (alleen in wintermaanden infiltratie) en S2A (jaarrond infiltratie)



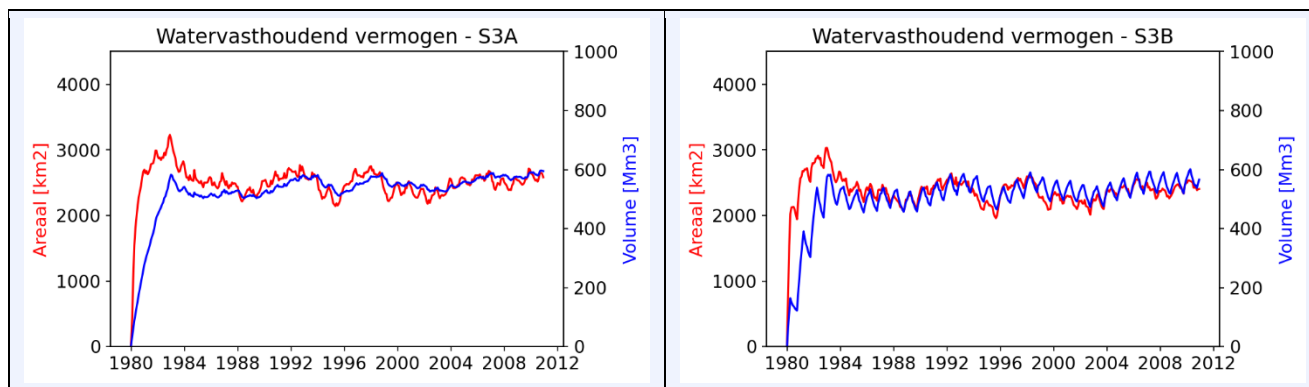
Figuur 4.19 Verandering van totale afvoer in mm/jaar (rivier en drainage systemen) na 3 jaar infiltratie (start in 1980) bij 3 jaar dagelijkse infiltratie (S2A: links) en 3 jaar dagelijkse infiltratie in de wintermaanden (S2B: rechts). Blauwe kleuren tonen een toename in afvoer en groene kleuren een afname.



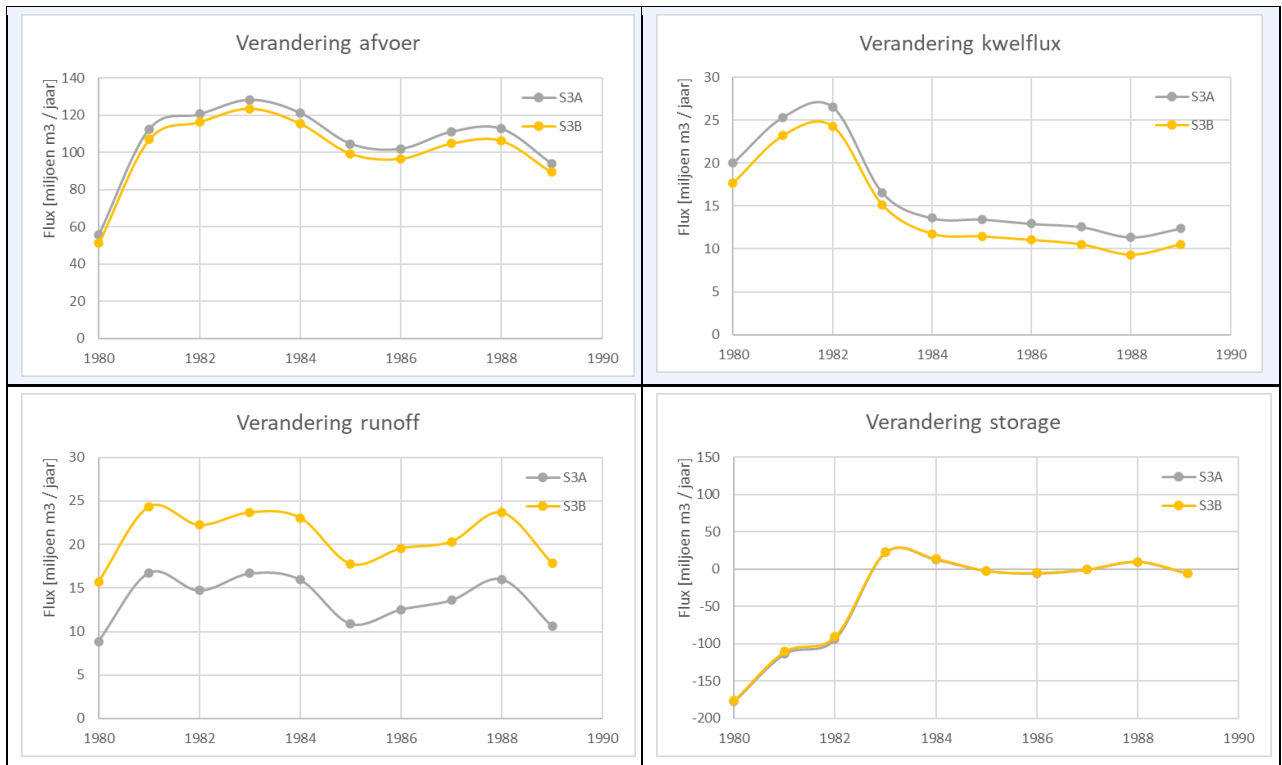
Figuur 4.20 Verandering van kwelflux in mm/jaar na 3 jaar infiltratie (start in 1980) bij 3 jaar dagelijkse infiltratie (S2A: links) en 3 jaar dagelijkse infiltratie in de wintermaanden (S2B: rechts). Rode kleuren tonen een toename in huidige kwelflux en paarse kleuren tonen de kwelflux in de scenario situatie (S1) waar in de referentie een infiltratiegebied aanwezig was maar door de verhoogde grondwaterstand veranderend is naar een kwelgebied.

#### 4.4.3 Infiltreren en onttrekken (scenario S3A en S3B)

Het creëren van infiltratieplassen zorgt voor een toename van beschikbaar water in de ondergrond dat in droge tijden gebruikt kan worden door het te onttrekken via winningsputten. Ondanks dat er twee keer zo veel water geïnfiltreerd wordt via infiltratieplassen dan dat er onttrokken wordt via winningsputten, blijft het volume water dat in de ondergrond geborgen wordt, na 1 á 2 jaar infiltreren en onttrekken constant (Figuur 4.21). Er is blijkbaar vrij snel een evenwicht ontstaan tussen de jaarlijks extra infiltratie, de onttrekking en de afvoer van het grondwater (Figuur 4.22).

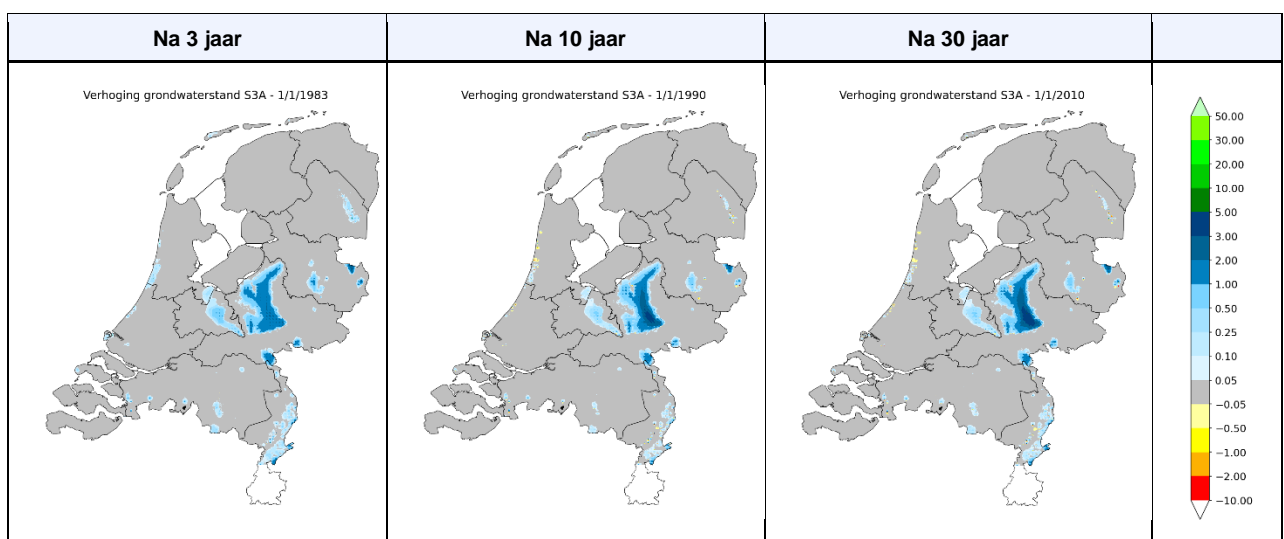


Figuur 4.21 De verandering van het volume aan geborgen grondwater in de tijd door 30 jaar lang jaarlijkse infiltratie (start in 1980) en onttrekkingen vanaf 1983 (uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup>) en het beïnvloed areaal bij dagelijkse infiltratie gedurende het jaar (S3A: links) en dagelijkse infiltratie in de wintermaanden (S3B: rechts), over tijd. NB: De hoeveelheid geborgen grondwater is hier berekend als grondwaterstandsverhoging vermenigvuldigd met oppervlak en een porositeit van 0.3. Dit zijn andere getallen dan berekend in de waterbalans door Modflow zoals in onderstaande figuur.



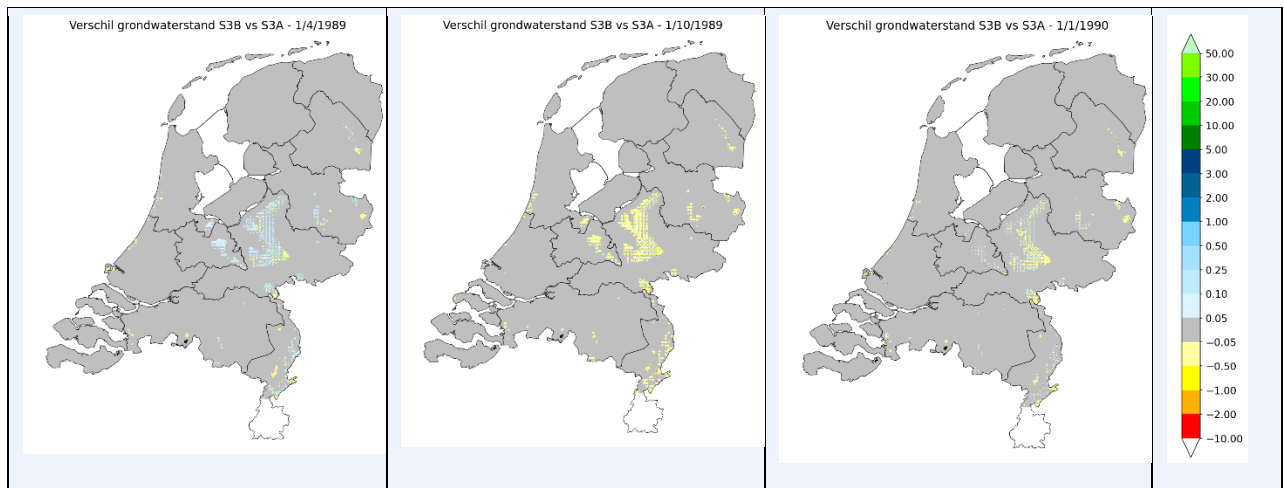
Figuur 4.22 Verandering in fluxen [miljoen m<sup>3</sup>/jaar] door 30 jaar lang jaarlijkse infiltratie (start in 1980) en onttrekkingen vanaf 1983 (uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup>) en het beïnvloed areaal bij dagelijkse infiltratie gedurende het jaar (S3A) en dagelijkse infiltratie in de wintermaanden (S3B), door de tijd.

Ondanks dat er twee keer zo veel water geïnfiltreerd dan onttrokken wordt, zijn er gebieden waar grondwaterstanden zakken in plaats van stijgen ten opzichte van het referentie scenario (gele kleuren; Figuur 4.23). Bij het jaarrond water infiltreren en onttrekken (variant 3A) is het areaal met dalende grondwaterstanden, van meer dan 5 centimeter, 96 km<sup>2</sup> ten opzichte van 2591 km<sup>2</sup> stijgend. In variant 3A is dus 3.7% van het beïnvloede areaal dalend van karakter (Tabel 4.5). Wanneer er alleen in de winter water wordt geïnfiltreerd en in de zomer water wordt onttrokken (variant 3B) is dit areaal 132 km<sup>2</sup> ten opzichte van 2485 km<sup>2</sup>, dus 5.0% van het beïnvloede areaal dalend van karakter. Hier is duidelijk het watervasthoudend vermogen minder groot en kan de extra infiltratie niet voorkomen dat grondwaterstanden gaan dalen.



Figuur 4.23 Verhoging van grondwaterstanden (m) bij infiltratieplassen en onttrekkingssputten (S3A).

In de onderstaande figuur staat het verschil in grondwaterstand tussen het jaarrond infiltreren (variant 3A) en halfjaarlijks infiltreren (variant 3B). De grondwaterstand is aan het einde van de winterperiode hoger voor variant 3B en einde zomerperiode lager.



*Figuur 4.24 Verschil in grondwaterstanden (m) tussen scenario S3B (in wintermaanden infiltreren en zomermaanden onttrekken) en S3A (jaarrond infiltreren en onttrekken). De verschilkaartjes geven de situatie in 1989 weer (na 3 jaar infiltreren en vervolgens 7 jaar infiltreren en onttrekken) voor eind winterperiode, einde zomerperiode en halverwege de winter.*

Door de stijging van het grondwater als gevolg van de infiltratie is in sommige gebieden de grondwaterstand ondieper gekomen dan 1 meter onder maaiveld. Dit kan wateroverlast problemen veroorzaken in bebouwd gebied. Gebieden waar dit voorkomt zijn Bussum, Huizen, Eemnes, Haarlem en Heemstede (Figuur 4.25). In deze gebieden zou een lagere infiltratieflex kunnen helpen om wateroverlast te voorkomen of het aanleggen van extra drainage. In variant 3B is het areaal met te hoge grondwaterstanden 10 km<sup>2</sup> kleiner dan in variant 3A (areaal = 136 km<sup>2</sup>).

*Tabel 4.5 Beïnvloed areaal (km<sup>2</sup>) door 30 jaar lang jaarlijkse infiltratie (start in 1980) en onttrekkingen vanaf 1983 (uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup>) en het beïnvloed areaal bij dagelijkse infiltratie gedurende het jaar (S3A) en dagelijkse infiltratie in de wintermaanden (S3B), over tijd.*

	Areaal dalend	Areaal stijgend	Areaal met GWS ondieper dan 1m-mv
<b>S3A</b>	96	2591	136
<b>S3B</b>	132	2485	126

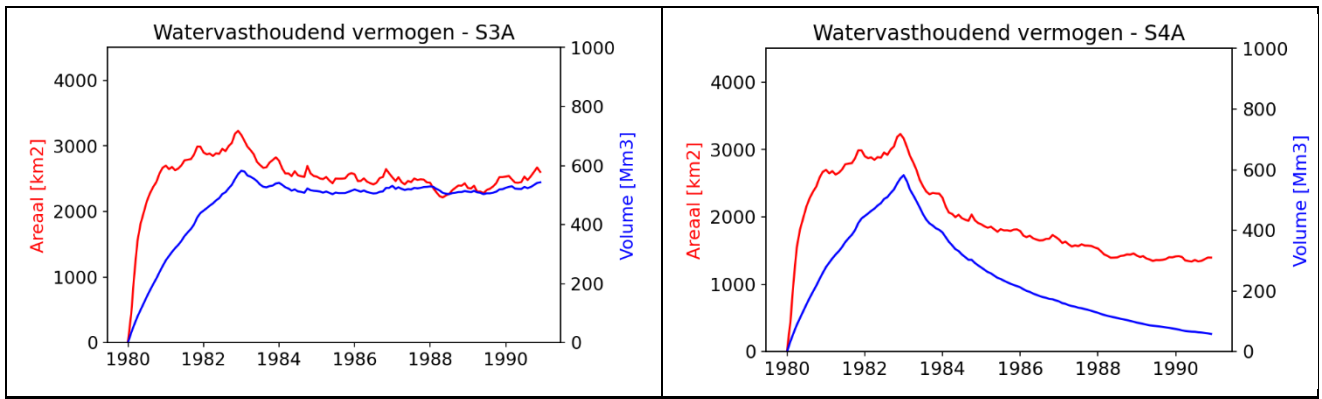


Figuur 4.25 Locaties met verhoging van grondwaterstanden tot boven 1m-mv.

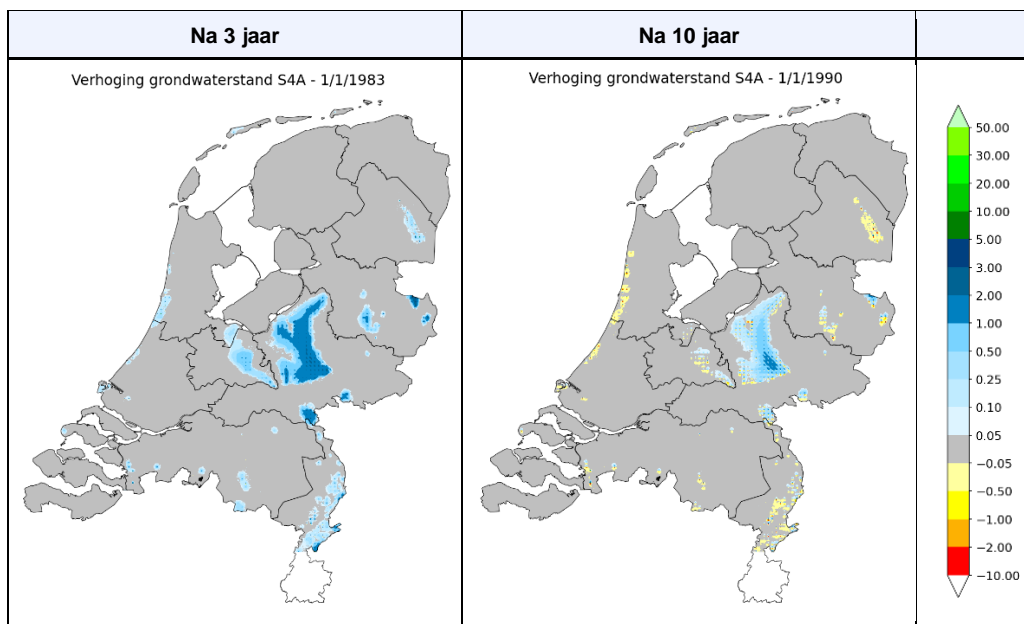
#### 4.4.4 Infiltreren en onttrekken (scenario S4A)

In een vierde scenario is gekeken naar het effect van een infiltratie en onttrekkingsregime waarbij vanaf het 4<sup>de</sup> jaar, jaarrond evenveel water wordt onttrokken als dat er wordt geïnfiltreerd (zie Tabel 4.1). Binnen 8 jaar neemt het extra volume water dat in de ondergrond geborgen wordt door de initiële drie jaar infiltratie, af tot nagenoeg nul (Figuur 4.26). Alleen op de Veluwe en enkele heuvelruggen in Gelderland en Overijssel zijn na 10 jaar nog verhoogde grondwaterstanden te vinden (Figuur 4.27). In andere gebieden zijn dalingen in grondwaterstanden te vinden. In deze gebieden is de gemodelleerde grondwateraanvulling door infiltratieplassen niet in evenwicht met de dieper gelegen onttrekkingen. Dit is ook logisch want er wordt evenveel onttrokken als geïnfiltreerd en er vindt ook nog extra afvoer plaats als gevolg van de extra infiltratie.

Grondwater kan goed worden vastgehouden in deze kerninfiltratiegebied met de afwezigheid van ontwatering, maar er is altijd een deel dat weglekt naar de omgeving. Daarom is het aan te bevelen om significant meer te infiltreren dan te onttrekken om zeker te zijn dat effecten van onttrekkingen volledig worden gecompenseerd. De extra grondwaterstandsverhoging en verhoogde afvoer en kwel op de flanken van de infiltratiegebieden die hierdoor worden veroorzaakt, kunnen als winst voor het grondwatersysteem en waterafhankelijke natuur worden gezien.



Figuur 4.26 De verandering van het volume aan geborgen grondwater in de tijd tot 1990, door 3 jaar lang jaarlijkse infiltratie (start in 1980) en onttrekkingen vanaf 1983 (uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup>) en het beïnvloed areaal bij het scenario waarbij de helft van de infiltratiehoeveelheid wordt onttrokken (S3A: links) en het scenario waarbij dezelfde infiltratiehoeveelheid wordt onttrokken (S4A: rechts), over tijd. NB: De hoeveelheid geborgen grondwater is hier berekend als grondwaterstandsverhoging vermenigvuldigd met oppervlak en een porositeit van 0.3.



Figuur 4.27 Verhoging van grondwaterstanden (m) bij infiltratieplassen en onttrekkingsputten (S4A).

## 4.5 Conclusie en discussie

Met onderliggende deelstudie is inzicht verkregen in de potentie van grootschalige kunstmatige infiltratie door het aanvullen van het grondwatersysteem door infiltratie van water aan het oppervlak via bijvoorbeeld infiltratievijvers waarbij het water door de zwaartekracht via de onverzadigde zone naar het grondwater percoleert (MAR). Hierbij wordt gebruikt gemaakt van de ruimte die er is boven de grondwaterstand.

Bij deze verkenning is gebruik gemaakt van modeberekeningen met het LHM, en is uitsluitend gekeken naar de fysieke mogelijkheden die de ondergrond biedt. Het transport en beschikbaarheid van infiltratiewater, de eventuele noodzaak tot voorzuiveren, als ook de kosten en maatschappelijk draagvlak zijn in deze verkenning buiten beschouwing gelaten.

De verkenning is op nationaal schaalniveau uitgevoerd en dient als een eerste indruk van wat er mogelijk zou zijn. Deze eerste verkenning moet uitnodigen tot verder onderzoek dat uiteraard op een veel lokaler schaalniveau zou moeten plaatsvinden.

In deze studie is niet de potentie van ASR modelmatig verkend maar is wel een geschiktheidskaart voor ASR vanuit het COASTAR project gepresenteerd. Met ASR wordt het grondwater door de injectie van water via grondwaterputten plaats en vervolgens onttrekkingen via dezelfde put. Het gaat hier niet om het toevoegen van extra grondwater maar het bergen van grondwater met een bepaalde kwaliteit dat het aanwezige grondwater vervangt of wegdrukt, bijvoorbeeld het opslaan van zoet water in een zoute omgeving.

De belangrijkste bevindingen van de modelmatige verkenning van **MAR-systemen** staan hieronder opgesomd.

- De gebieden met relatief diepe grondwaterstanden (dieper dan 2.5 m onder maaiveld) zijn geschikt voor het opslaan van grondwater door extra infiltratie.
- Het extra opgeslagen grondwater begint direct na infiltratie richting de ontwateringsmiddelen te stromen en wordt daarna afgevoerd. Hoe groter de afstand tot de ontwateringsmiddelen (en hoe lager de doorlatendheid), hoe langer dit grondwater kan worden vastgehouden.
- Gemiddeld voor de gebieden met een grondwaterstand dieper dan 2.5 m-mv, is na 3 jaar het extra volume aan opgeslagen water gehalveerd en na zeven jaar is er nog steeds een kwart van over.
- Onder de Veluwe kan het water het langste worden vastgehouden omdat dit het grootste aaneengesloten gebied is zonder ontwatering. Het is tevens het gebied met de diepste grondwaterstanden en daarmee het meest kansrijk voor grootschalige MAR.
- Vergelijkbare gebieden zoals Utrechtse Heuvelrug, Sallandse Heuvelrug en andere stuwwallen zijn eveneens kansrijk.
- Wanneer er twee keer zoveel wordt geïnfilteerd als onttrokken, treedt er slechts voor 5% van het gebied een grondwaterstandsval op. Voor het overige gebied stijgt de grondwaterstand en neemt de afvoer en kwel rondom de infiltratiegebieden toe. Dit kan als zeer positief voor de omgeving worden beschouwd.
- Slechts in een klein deel (5%) van het beïnvloed gebied neemt de grondwaterstand toe tot ongeveer 1.0 m-mv of ondieper en zou wateroverlast kunnen optreden. Een lagere infiltratieflux zou kunnen helpen om wateroverlast te voorkomen of het aanleggen van extra drainage.
- De doorberekende modelvarianten geven een goed beeld van de potentie van MAR wanneer de helft van het infiltratievolume wordt onttrokken. De hoeveelheid die redelijkerwijs zonder noemenswaardige nadelige kwantitatieve effecten kan worden onttrokken ligt in de orde grootte van 140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, waarvan ongeveer de helft voor rekening komt van de Veluwe.
- Door de geringe effecten kan deze hoeveelheid van 140 miljoen m<sup>3</sup> als een ondergrens worden gezien. In sommige gebieden is zeer waarschijnlijk meer mogelijk.



- Door twee keer zoveel te infiltreren als te onttrekken kunnen negatieve effecten van onttrekkingen zoals grondwaterstandsdeling, kwelreductie en afname van (beek)afvoeren goed worden gecompenseerd. Er vinden voor het grootste deel van het gebied (~95%) zelfs positieve effecten plaats dat zich uit in een stijging van de grondwaterstand en toename van kwel en beekafvoer op de flanken van de infiltratiegebieden.
- Er is nauwelijks verschil of er jaarrond of halfjaarlijks water wordt geïnfiltreerd en onttrokken. In beide gevallen reageert het grondwatersysteem in vergelijkbare mate.
- Het is aan te bevelen een aantal jaren voor dat met onttrekken wordt begonnen met infiltreren te beginnen om een extra grondwatervoorraad op te bouwen zodat er negatieve effecten optreden zoals grondwaterstandsdingen en kwelafname.
- Wanneer er evenveel wordt onttrokken als geïnfiltreerd zijn de positieve effecten logischerwijs een stuk minder groot. Voor de meeste gebieden treden er dan juist wel structurele grondwaterstandsdingen op, maar uiteraard veel minder dan wanneer niet wordt geïnfiltreerd. De negatieve effecten van de winningen worden op deze manier dus wel beperkt. Voor de Veluwe is na 10 jaar nog steeds een positief effect zichtbaar omdat hier de opbouw van de extra grondwatervoorraad in de eerste 3 jaar nog deels in het systeem aanwezig is (traag systeem). Maar de modelberekeningen laten zien dat er op termijn ook voor de Veluwe structurele dalingen zullen optreden (na 15 jaar ongeveer).
- Het advies is dus meer infiltreren dan onttrekken.
- Infiltratie ter compensatie van negatieve effecten door grondwateronttrekkingen is altijd een goed idee en kan voor de meeste bestaande grondwateronttrekkingen worden toegepast.
- Een perspectief biedend alternatief is het overvloedig aanwezige oppervlaktewater in de winter niet gebruiken voor infiltratie maar er direct drinkwater van bereiden. Bestaande winningen kunnen dan worden gereduceerd want in de winterperiode hoeft er dan geen grondwater worden onttrokken en kan er systeemherstel optreden (de grondwatervoorraad groeit). Dit wordt ook wel het substitutieconcept genoemd. In de zomer als er een tekort aan schoon oppervlaktewater is, wordt het drinkwater vooral uit grondwater bereid.

#### *Aandachtspunten*

Uiteraard zijn er een aantal belangrijke punten die veel meer aandacht verdienen wanneer voor een gebied de potentie van MAR nader wordt bepaald. Deze worden kort opgesomd.

- Beschikbaarheid van water voor infiltratie en transport (pijpleidingen) van dit water richting de hoger gelegen infiltratieplassen (energiekosten pompen).
- Het ontwikkelen van infiltratieplassen vergt ruimte. In de doorberekende modelvarianten is uitgegaan van 2500 ha aan infiltratieplassen, een infiltratieplas van 6.25 ha per infiltratie-eenheid van 6.25 km<sup>2</sup>. De infiltratieplassen dienen zo ingericht te worden dat ze in het landschap passen en een natuurfunctie kunnen vervullen.
- Beheer van infiltratieplassen. Infiltratieplassen kunnen na verloop van tijd hun infiltratiecapaciteit verliezen door sedimentatie van organisch materiaal of inspoeling van kleinere bodemdeeltjes.
- Een extra belangrijk aandachtspunt is de kwaliteit van het te infiltreren water dat altijd een andere samenstelling heeft dan het ontvangende grondwater. Dit kan leiden tot ongewenste verandering van de grondwaterkwaliteit, ook wel aangeduid als vergrijzing van het grondwater. Een deel van dit vergrijsd grondwater kan uiteindelijk ook weer aan het oppervlak komen in kwelgebieden en bronbeken / sprengen, en kan daar de grondwaterafhankelijke natuur negatief beïnvloeden (zie o.a. Van Dam, 2020).
- Vergrijzing van het grondwater door kunstmatige infiltratie van water kan worden voorkomen door voorzuivering of het gebruik van schone bronnen (bijv. opgevangen kwelwater).

## 5 Conclusies potentiële aanvullende grondwatervoorraden

In deze studie zijn grondwatervoorraden verkend die naast de huidig bekende voorraden van de ASV's en het te karteren natuurlijk kapitaal aan grondwater mogelijk ingezet kunnen worden voor de drinkwatervoorziening op de lange termijn. De volgende potentiële aanvullende grondwatervoorraden zijn geïdentificeerd waarvan de potentie ervan in deze studie is verkend:

- Grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer
- Inzet van kwelwater in polders en aan de voet van heuvelruggen
- Kunstmatige infiltratie en terugwinning (MAR)

We hebben daarbij alleen naar de fysieke mogelijkheden in termen van hoeveelheden en effecten op het grondwatersysteem bekeken en nadrukkelijk niet naar socio-economische haalbaarheid. Het betreft een verkenning op nationaal schaalniveau en dient als een eerste indruk van wat er mogelijk zou zijn. De resultaten dienen voornamelijk als indicatief en niet als absoluut te worden geïnterpreteerd. Deze eerste verkenning moet uitnodigen tot verder onderzoek dat uiteraard op een veel lokaler schaalniveau zou moeten plaatsvinden en veel meer elementen moet omvatten zoals omgevingseffecten en risicoanalyse, kosten-baten en maatschappelijk draagvlak. Bij de verkenning is gebruik gemaakt van modelberekeningen met het Landelijk Hydrologisch Instrumentarium (LHM) en LHM zoetzout.

De modelverkenning laat zien dat alle drie de typen aanvullende grondwatervoorraden in potentie kansrijk zijn. Hieronder worden de belangrijkste bevindingen van de verkenning van de potentie van de aanvullende voorraden opgesomd.

### **Grondwater onder het IJsselmeer en Markermeer:**

- Onder het IJsselmeer zijn in potentie grote hoeveelheden zoet tot brak grondwater beschikbaar voor drinkwaterwinning.
- Door het brakke karakter van het onttrokken grondwater zal ontzilting altijd nodig zijn.
- De studie laat zien dat er 120-140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar kan worden gewonnen zonder dat dit veel negatieve effecten heeft op het regionale grondwatersysteem van het IJsselmeergebied.
- Het grote voordeel van het onttrekken onder het IJsselmeer en Markermeer is dat er aanvulling vanuit de meren plaatsvindt zodat de negatieve effecten op het ondiepe grond- en oppervlaktewatersysteem worden gecompenseerd.
- De extra infiltratie vanuit het IJsselmeer en Markermeer als gevolg van de onttrekkingen is slechts zo'n 2% van de totale aanvoer door de IJssel in droge perioden waardoor grondwateronttrekkingen van beperkte invloed zijn op het waterpeilbeheer en de totale waterbalans in het IJsselmeer.
- De toenemende infiltratie door de onttrekkingen heeft ook tot gevolg dat, zeker in het zuidelijk deel van het IJsselmeergebied de beschikbare hoeveelheid zoetwater in de ondiepe ondergrond toe neemt.
- Het zuidelijke deel van het IJsselmeer lijkt de grootste potentie te hebben voor grondwateronttrekkingen. In het noorden zorgen keileem afzettingen voor een dikke, relatief ondiepe slecht doorlatende laag. Hier speelt zoutwater opkegeling een grotere rol waardoor het onttrokken grondwater te zout kan worden (>5 g/L Cl). Zoutgehaltes die groter zijn dan 5 g/l chloride worden als minder of niet geschikt geacht voor ontzilting door omgekeerde osmose.

- Afhankelijk van de locaties van de onttrekkingen nemen de kwelfluxen en daarmee de zoutbelasting in de omliggende diepe polders ook af. Dit effect is het sterkste wanneer de onttrekkingen in een zone dicht bij de diepe polders (Flevopolders en Wieringenmeerpolder) worden geplaatst en kan als gunstig worden aangemerkt. De verzilting in deze polders neemt dan af en er hoeft minder water worden uitgemalen.
- De grondwaterstandsverlaging in de polder is wel een aandachtspunt in verband met bodemdalings-gevoelige gebieden.
- Indien het IJsselmeergebied als aanvullende grondwatervoorraad in gebruik wordt genomen dient afgewogen te worden welk van de scenario's de meeste maatschappelijke en hydrologische voordelen oplevert en wat eventueel acceptabele negatieve effecten zijn.
- Ook is de technische haalbaarheid van de winningen van belang. Aangezien de scenario's uitgaan van winningen onder een waterbodem levert dit grotere uitdagingen op qua bijvoorbeeld benodigde infrastructuur ten opzichte van winning op land.

## Inzet van kwelwater

### *Passieve kwelwaterwinning in polders:*

- Bij passieve kwelwaterwinning wordt het kwelwater nadat het is uitgetreden in het oppervlaktewatersysteem samen met het neerslagoverschot gebruikt voor drinkwaterbereiding.
- In polders met een zeer sterke kwelflux is jaarrond sprake van een wateroverschot dat moet worden afgevoerd. Dit water kan worden ingezet voor de productie van drinkwater. Het is daarbij van belang dat er zoveel kwel is dat er in de zomer ook nog een significant wateroverschot aanwezig is.
- Uit deze studie komen drie polders naar voren waar de kwelflux voldoende sterk is om jaarrond winning mogelijk te maken: dit zijn de Koekoekspolder (zoet kwelwater), polder Horstermeer (brak kwelwater) en de Bethunepolder (zoet kwelwater). De potentie van deze kwelgebieden is samen 60 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Hiervan wordt een deel al benut met de winningen van de Bethunepolder Waternet.
- Een voordeel van deze winmethode is dat effecten op de omgeving erg beperkt zijn, maar een nadeel is dat het kwelwater mengt met het oppervlaktewater en het risico op verontreinigen daardoor hoger is.
- Passieve kwelwaterwinning legt daardoor wel beperkingen op wat betreft het landgebruik in relatie tot het gebruik van meststoffen en bestrijdingsmiddelen.
- Overige polders zijn wellicht wel interessante locaties om gedurende de winter in te zetten voor drinkwaterproductie als aanvulling op andere winningen. Polders die hiervoor in aanmerking komen zijn: Tempelpolders, Vrouwenverdriet, Noordmeer en Bijlmermeer. In deze polders kan samen rond de 10 miljoen m<sup>3</sup> per jaar gewonnen worden gedurende de helft van het jaar.

### *Actieve kwelwaterwinning in polders:*

- Bij actieve kwelwinning wordt grondwater onttrokken voordat het als brak-zout kwelwater in het oppervlaktewatersysteem uittreedt en hiermee tevens de zoutbelasting van de polder reduceert. Waternet onderzoekt momenteel de mogelijkheden om brak grondwater uit de Horstermeer te onttrekken en in te zetten voor drinkwaterbereiding.
- Belangrijk is hierbij om te zorgen dat grondwatereffecten op de omgeving beperkt blijven.
- Uit deze studie blijkt dat onttrekkingen in sommige polders tot grotere grondwaterverlaging in de omgeving leiden dan bij andere polders. De locatie en het debiet van de winning hebben hier invloed op, maar ook het type kwelgebied en de lokale geohydrologie.

- Een aantal polders die in deze studie als mogelijk geschikt voor actieve kwelwaterwinning worden aangemerkt zijn: polder Horstermeer, Waverveen, Purmer, Koekoekspolder en de Zuidplaspolder. Cumulatief leveren onttrekkingen in deze polders 16 miljoen m<sup>3</sup> water per jaar op, dat geschikt is voor de bereiding van drinkwater.
- Voor een aantal polders zorgt de diepe onttrekking ook tot een reductie van de zoutvracht van ca. 20% tot 40%. Dit is een positieve bijvangst van deze onttrekkingstechniek.
- Maatwerk is nodig om te bepalen in welke gebieden wanneer wel effectief en zonder veel omgevingseffecten, kwelwater afgevangen kan worden. Ook kan een combinatie van passieve en actieve kwelwaterwinning een mogelijkheid zijn. Door bijvoorbeeld te schakelen tussen zomer (actief) en winter (passief) winningen.

*Onttrekkingen aan de voet van hoger gelegen heuvelruggen:*

- De potentie van diepe onttrekkingen in kwelgebieden aan de voet van (zandige) infiltratiegebieden is verkend voor de Brabantse Wal en het kwelgebied aan het Veluwemeer.
- Hoewel de modelering uitwijst dat in beide gebieden geschikt water (niet zout) kan worden gewonnen, zijn de effecten op de freatische grondwaterstanden en de kwelflux groot.
- Actieve grondwateronttrekkingen aan de voet van heuvelruggen zullen altijd leiden tot extra grondwaterstands dalingen en reductie van kwelstromen. Hierbij zullen ze mogelijk schade toebrengen aan natuur die afhankelijk is van hoge grondwaterstanden en kwel. Dit geldt in ieder geval voor de Brabantse Wal en daarmee wordt dit type winning hier niet geschikt geacht.
- Voor het kwelgebied aan het Veluwemeer zijn de effecten minder groot maar ook hier kunnen kwelafhankelijke ecosystemen negatief beïnvloed worden. Met minder grote onttrekkingen zijn er wellicht gebieden te vinden waar geen nadelige effecten op grondwaterafhankelijke natuur plaatsvinden en kunnen in potentie kansrijk zijn.
- Echter, in het algemeen kan gesteld worden dat grondwaterwinningen aan de voet van hoger gelegen heuvelruggen, niet kansrijk zijn als aanvullende bron voor drinkwaterwinning op de lange termijn.
- Als de kwel aan de voet van de heuvelrug passief kan worden gewonnen, dan kan het een potentieel interessante aanvullende bron zijn (oppervlaktewaterwinning).

*Onttrekkingen onder veenplassen:*

- De modelresultaten van de winning van grondwater onder veenplassen laten zien dat de effectiviteit en de neveneffecten van de onttrekkingen sterk afhangen van de bodem- en deklaagweerstand onder de plassen.
- De Loosdrechtse en Vinkeveense plassen zijn geschikt voor een waterwinning, omdat de infiltratie van oppervlaktewater de onttrekking grotendeels dekt en de effecten op de omgeving beperkt zijn. Deze plassen staan namelijk deels in open verbinding met het eerste watervoerende pakket.
- Het winbare volume onder de Loosdrechtse en Vinkeveense plassen is ongeveer 20 tot 40 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Het is echter de vraag of een toename in de oppervlaktewater vraag gedurende de zomer als gevolg van de extra infiltratie in dit gebied gewenst is.
- De Reeuwijkse en Nieuwkoopse plassen zijn niet geschikt voor een waterwinning, omdat de infiltratie van oppervlaktewater onvoldoende is en de effecten op de grondwaterstand in de omgeving en het zoet-zout grensvlak groot zijn. De uitstralingseffecten zijn groot door de grote weerstand tussen de plassen en het eerste watervoerende pakket.

## Kunstmatige infiltratie en terugwinning

- De gebieden met relatief diepe grondwaterstanden (dieper dan 2.5 m onder maaiveld) zijn geschikt voor het opslaan van zoet grondwater door extra infiltratie.
- Het extra opgeslagen grondwater begint direct na infiltratie richting de ontwateringsmiddelen te stromen en wordt daarna afgevoerd. Hoe groter de afstand tot de ontwateringsmiddelen (en hoe lager de doorlatendheid), hoe langer dit grondwater kan worden vastgehouden.
- Gemiddeld voor de gebieden met een grondwaterstand dieper dan 2.5 m-mv, is na 3 jaar het extra volume aan opgeslagen water gehalveerd en na zeven jaar is er nog steeds een kwart van over.
- Onder de Veluwe kan het water het langste worden vastgehouden omdat dit het grootste aaneengesloten gebied is zonder ontwatering. Het is tevens het gebied met de diepste grondwaterstanden en daarmee het meest kansrijk voor grootschalige MAR.
- Vergelijkbare gebieden zoals Utrechtse Heuvelrug, Sallandse Heuvelrug en andere stuwwallen zijn eveneens kansrijk.
- Wanneer er twee keer zoveel wordt geïnfiltreerd als onttrokken, treedt er slechts voor 5% van het gebied een grondwaterstands daling op. Voor het overige gebied stijgt de grondwaterstand en neemt de afvoer en kwel rondom de infiltratiegebieden toe. Dit kan als zeer positief worden beschouwd voor de omgeving.
- Slechts in een klein deel (5%) van het beïnvloed gebied neemt de grondwaterstand toe tot ongeveer 1.0 m-mv of ondieper en zou wateroverlast kunnen optreden. Een lagere infiltratieflux zou kunnen helpen om wateroverlast te voorkomen of het aanleggen van extra drainage.
- De doorberekende modelvarianten geven daarmee een goed beeld van de potentie van MAR wanneer de helft van het infiltratievolume wordt onttrokken. De hoeveelheid die redelijkerwijs zonder noemenswaardige nadelige kwantitatieve effecten kan worden onttrokken ligt in de orde grootte van 140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar, waarvan ongeveer de helft voor rekening komt van de Veluwe.
- Door de geringe effecten kan deze hoeveelheid van 140 miljoen m<sup>3</sup> per jaar als een ondergrens worden gezien. In sommige gebieden is zeer waarschijnlijk meer mogelijk.
- Door twee keer zoveel te infiltreren als te onttrekken kunnen negatieve effecten van onttrekkingen zoals grondwaterstands daling, kwelreductie en afname van (beek)afvoeren goed worden gecompenseerd. Er vinden voor het grootste deel van het gebied (~95%) zelfs positieve effecten plaats dat zich uit in een stijging van grondwaterstand en toename van kwel en beekafvoer op de flanken van de infiltratiegebieden.
- Er is nauwelijks verschil of er jaarrond of halfjaarlijks water wordt geïnfiltreerd en onttrokken. In beide gevallen reageert het grondwatersysteem in vergelijkbare mate.
- Het is aan te bevelen een aantal jaren voor dat met onttrekken wordt begonnen met infiltreren te beginnen om een extra grondwater voorraad op te bouwen zodat er negatieve effecten optreden zoals grondwaterstands dalingen en kwelafname.
- Wanneer er evenveel wordt onttrokken als geïnfiltreerd zijn de positieve effecten logischerwijs een stuk minder groot. Voor de meeste gebieden treden er dan juist wel structurele grondwaterstands dalingen op, maar uiteraard veel minder dan wanneer niet wordt geïnfiltreerd. De negatieve effecten van de winningen worden op deze manier dus wel beperkt. Voor de Veluwe is na 10 jaar nog steeds een positief effect zichtbaar omdat hier de opbouw van de extra grondwater voorraad in de eerste 3 jaar nog deels in het systeem aanwezig is (traag systeem). Maar de modelberekeningen laten zien dat er op termijn ook voor de Veluwe structurele dalingen zullen optreden (na 15 jaar ongeveer).
- Het advies is dus meer infiltreren dan onttrekken.

- Infiltratie ter compensatie van negatieve effecten door grondwateronttrekkingen is altijd een goed idee en kan voor de meeste bestaande grondwateronttrekkingen worden toegepast.
- Uiteraard zijn er een aantal belangrijke punten die veel meer aandacht verdienen wanneer voor een gebied de potentie van MAR nader wordt bepaald. Deze worden kort opgesomd.
  - Beschikbaarheid van water voor infiltratie en transport (pijpleidingen) van dit water richting de hoger gelegen infiltratieplassen (energiekosten pompen).
  - Het ontwikkelen van infiltratieplassen vergt ruimte en dienen zo ingericht te worden dat ze in het landschap passen en een natuurfunctie kunnen vervullen.
  - Beheer en onderhoud van infiltratieplassen.
  - Een extra belangrijk aandachtspunt is de kwaliteit van het te infiltreren water dat altijd een andere samenstelling heeft dan het ontvangende grondwater. Dit kan leiden tot ongewenste verandering van de grondwaterkwaliteit, ook wel aangeduid als vergrijzing van het grondwater. Vergrijzing van het grondwater door kunstmatige infiltratie van water kan worden voorkomen door voorzuivering of het gebruik van schone bronnen (bijv. opgevangen kwelwater).
- Een perspectief biedend alternatief is het overvloedig aanwezige oppervlaktewater in de winter niet gebruiken voor infiltratie maar er direct drinkwater van bereiden. Bestaande winningen kunnen dan worden gereduceerd want in de winterperiode hoeft er dan geen grondwater worden onttrokken en kan er systeemherstel optreden (de grondwatervoorraad groeit). Dit wordt ook wel het substitutieconcept genoemd. In de zomer als er een tekort aan schoon oppervlaktewater is, wordt het drinkwater vooral uit grondwater bereid.

## 6 Referenties

America, I., Mulder, T., & Delsman, J. (2021). Veranderingsrapportage en plausibiliteitstoets LHM zoet-zout 4.1, Deltares rapport 11206798-013-BGS-0001.

Becker, M.W., Georgian, T., Ambrose, H., Siniscalchi, J., Fredrick, K., 2004. Estimating flow and flux of groundwater discharge using water temperature and velocity. *Journal of Hydrology* 296, 221-233.

Beerendonk, E. (2014). High recovery reverse osmosis; samenvatting van vijf jaar onderzoek. KWR, Nieuwegein.

Bos-Burgering, L., Buijs, S., America, I., Klooster, J., de Louw, P. G. B., Delsman, J., Stofberg, S., Raat, K., Franssen, R., & Posma, J. (2021). Regionale en nationale opschaling COASTAR toepassingen. [COASTAR Regionale en nationale opschaling](#)

CBS (2021, June 30). Drinkwatergebruik 130 liter per persoon per dag in 2019. Centraal Bureau voor de Statistiek. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/26/drinkwatergebruik-130-liter-per-persoon-per-dag-in-2019#:~:text=Het%20drinkwatergebruik%20van%20huishoudens%20kwam,liter%20per%20persoon%20per%20dag>

Coastar. (n.d.). Kansrijkheid - Brakwaterwinning. Coastar. <https://www.coastar.nl/wp-content/uploads/COASTAR-Kansrijkeidskaart-Nederland-Brakwaterwinning.pdf>

Erkens, G. & Melman, R. (2020). Quicksan omvang Nederlands veenweidegebied. NOBV-memo.

De Louw, 2020. Het Nationale Gieter Idee op de Veluwe. <https://www.deltares.nl/nl/nieuws/het-nationale-gieter-idee-op-de-veluwe/>

De Louw, P.G.B., J. Peters, V. Kaandorp & A. Oost (2020). Verkennend rekenen aan grootschalige infiltratie op de Veluwe. H2O – juni 2020.

De Louw, P.G.B., Witte, J. P., van den Eertwegh, G. A. P. H., Bartholomeus, R. P., Pouwels, J., & Hunink, J. (2022). Beter bestand tegen droogte: oplossingsrichtingen voor een hydrologisch goed functionerend grondwatersysteem in de zandgebieden van Nederland. *Stromingen: vakblad voor hydrologen*, 28(1), 3-21.

De Louw P., G. Oude Essink, P. Stuyfzand en S. van der Zee (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, the Netherlands. *Journal of Hydrology* 394, pag. 494-506.

De Louw, P.G.B. (2013). Saline seepage in deltaic areas. Preferential groundwater discharge through boils and interactions between thin rainwater lenses and upward saline seepage. Vrije Universiteit Amsterdam, Academisch proefschrift, ISBN/EAN 9789461085429.

Delsman, J. R., Mulder, T., Romero Verastegui, B., Bootsma, H., Zitman, P., Huizer, S., & Oude Essink, G. H. P. (2023). Reproducible construction of a high-resolution national variable-density groundwater salinity model for the Netherlands. *Environmental Modelling & Software*, 164, 105683. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105683>

Gibbard, P. L., & Lewin, J. (2016). Filling the North Sea Basin: Cenozoic sediment sources and river styles (André Dumont medallist lecture 2014). *Geologica Belgica*.

Gibbard, P.L. & Cohen, K.M. (2015). Quaternary evolution of the North Sea and the English Channel. *Proceedings of the Open University Geological Society* 1, 63–74.

Helpdesk Water (2019). Handleiding Normering Chloride Drinkwater(bronnen) Werkversie Helpdesk Water juli 2019. <https://www.helpdeskwater.nl/@214714/handleiding-chloridenormeringdrinkwater-bronnen/>

Janssen, G., van Walsum, P., America, I., Pouwels, J., Hunink, J., Vermeulen, P., Meshgi, A., Prinsen, Mulder, N., Visser, M. & Kroon, T. (2020). Veranderingsrapportage LHM 4.1. Deltares Utrecht.

Oord, A., S. Burger, B. de la Loma Gomez, M. Waterloo, J. Velstra, & J. Landheer. (2019). Spaarwater 2 Eigen watervoorziening - ondergrondse berging perceelseigen

Oude Essink, G. & de Louw, P. G. B (2017). Deltafact: [Brakke kwel | STOWA](#)..

Oude Essink, G.H.P., Pauw, P.S., Van Baaren, E., Zuurbier, K., De Louw, P., Veraart, J., MacAteer, E., Van Der Schoot, M., Groot, N., Cappon, H., Waterloo, M., Hu-a-ng, K., Groen, M., 2018. GO-FRESH: Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening; Rendabel en duurzaam watergebruik in een zilte omgeving. <https://edepot.wur.nl/521462>

Overeem, I., Weltje, G. J., Bishop-Kay, C., & Kroonenberg, S. B. (2001). The Late Cenozoic Eridanos delta system in the Southern North Sea Basin: a climate signal in sediment supply? *Basin Research*, 13(3), 293-312

Pauw, P.S., Van Baaren, E.S., Visser, M. De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Increasing a freshwater lens below a creek ridge using a controlled artificial recharge and drainage system: a case study in the Netherlands., *Hydrogeology Journal* - Volume 23, Issue 7, pp 1415–1430 doi: 10.1007/s10040-015-1264-z

Peters, J.H., 2019. Ruimte nodig voor wateropslag? Kijk eens naar de Veluwe. *De Volkskrant*, 4 november 2019. <https://www.volkskrant.nl/columns-opinie/ruimtenodig-voor-wateropslag-kijk-eens-naar-de-veluwe~bf62145a/>

Romijn, E. (1975). Het onderzoeksprogramma van de Commissie Infiltratie Veluwe. H2O(8)-1975-nr.15.

Royal HaskoningDHV & Witteveen+Bos (n.d.), Gebiedsdossier Bethunepolder. Provincie Utrecht.

Rijkswaterstaat. (n.d.). Factsheet Grondwater(Deel-)Belang: Goede Chemische Kwaliteit ten behoeve van drinkwaterwinning. Bodem+. <https://www.bodemplus.nl/onderwerpen/bodem-ondergrond/grondwater/grondwater-ro/factsheets/drinkwaterwinning/>

Van Dam, H. (2020). Veluws grondwater: geen Wateraccu of Nationale Gieter, maar Biodiversiteitsmotor. H2O podium, <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2opodium/opinie/veluws-grondwater-geen-wateraccu-of-nationale-gieter-maarbiodiversiteitsmotor>

Van den Eertwegh, G.A.P.H., P.G.B. De Louw, J.P.M. Witte, M. Van Huijgevoort, R. Bartholomeus, D. Van Deijl, J.C. Van Dam., J. Hunink, I. America, J. Pouwels, P. Hoefsloot en



J. De Wit (2021) Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Het verhaal: analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen. Eindrapport Projectteam Droogte Zandgronden Nederland. KnowH2O, KWR, Deltares, WUR, HSS, FWE 178.

Van Dooren, T., K. Raat, S. Stofberg (2022). Deltafact: [Effecten van kunstmatige infiltratie van oppervlaktewater op de grondwaterkwaliteit | STOWA](#)).

Waternet (2020). Proef oppompen brakke kwel Horstermeerpolder voor drinkwater. <https://www.waternet.nl/werkzaamheden/brakke-kwel/>

Winnovatie (2020). Temmen van brakke kwel - In de Horstermeerpolder, <https://www.winnovatie.nl/innovaties-openbaar/2257634.aspx?t=Temmen-van-brakke-kwel-In-de-Horstermeerpolder>

Wesseling, J., 1980. Saline seepage in The Netherlands: occurrence and magnitude. Research on possible changes in the distribution of saline seepage in The Netherlands 26, 17–33. Committee for Hydrological Research (CHO-TNO), Proc. and Information.

Zuurbier, K. G., Janmaat, P., Raat, K. J., Ros, S. E. M., & ter Mors, G. (2017). Waterhergebruik en -berging met aquifer storage and recovery (ASR) op tuinbouwlocatie Nieuw-Prinsenland. H2O-Online.

Zuurbier, K. G., & Raat, K. J. (2018). Ondergrondse opslag vindt steeds meer toepassingen in Nederlandse Waterbeheer. H2O, 51(6–7), 34–37.

Zuurbier, K. G., Stuyfzand, P. J., & Hinsby, K. (2017). Completed demonstration of the use of extensively treated wastewater for ASR Coastal (TRL7). SubSol – D2.5. <https://library.kwrwater.nl/publication/55579819>

Zuurbier, K. G., van Dooren, T., & Ros, S. E. M. (2017). Improved ASR-Coastal Reference sites. Improved ASR-Coastal reference sites in Nootdorp an Westland, the Netherlands (TRL8). SubSol – D1.6. <https://library.kwrwater.nl/publication/56106965/>

## A Begrippenlijst

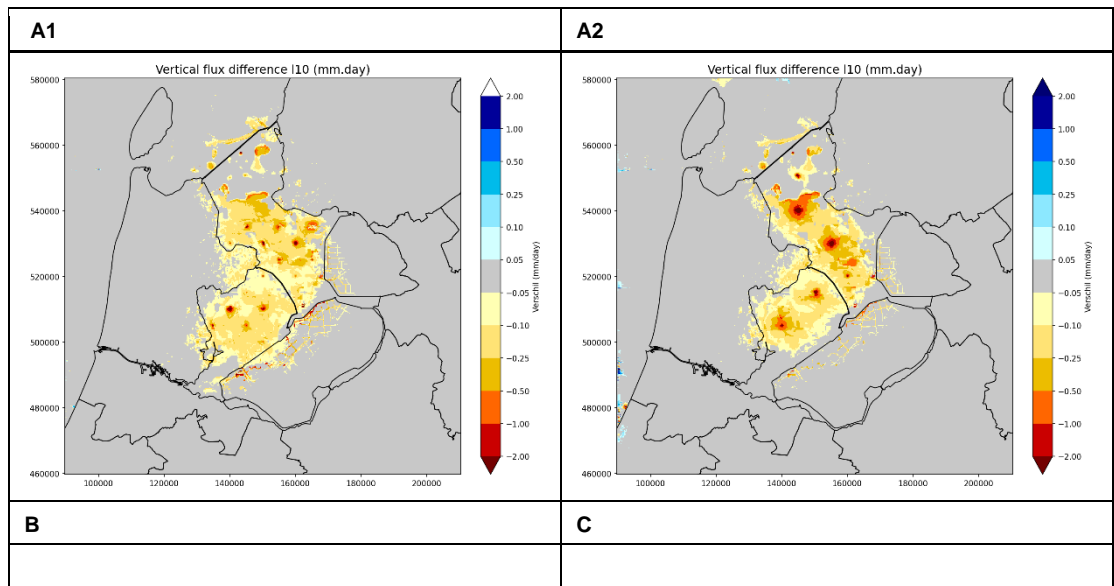
ASR	Aquifer Storage Recovery
ASV	Aanvullende Strategische Voorraden; waar de provincies verantwoordelijk zijn voor het borgen van de bronnen voor de drinkwatervoorziening op de middellange termijn (2040)
DMB-front	Het front van door de mens beïnvloed grondwater
GBES	Gesloten bodemenergiesystemen
GL, GH	Klimaatscenario's Gematigd lage waarde en Gematigd hoge waarde
GHB	GeoHydrologische Basis
GHG	Gemiddelde Hoge Grondwaterstand
GLG	Gemiddelde Lage Grondwaterstand
GVG	Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand
Go-Fresh	GO-FRESH (Geohydrological Opportunities Fresh Water supply) is een Kennis voor Klimaat (KvK) project in de Zuidwestelijke Delta
HDDW	Horizontal Directional Drilled Wells
HTO	Hoge temperatuuropslag
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWA	Klimaatbestendige Wateraanvoervoorziening West-Nederland
KWO of WKO	Koude-warmteopslag
KRW	Kaderrichtlijn Water
LG3	Laagste eenjarig grondwaterstand in LHM
LHM	Landelijk Hydrologische Model. De landelijke toepassingen van het NHI (Nederlands Hydrologisch Instrumentarium )
MAR	Managed Aquifer Recharge
MT-polder	Middelburg-Tempelpolder
NGR	Nationale Grondwater Reserves; Zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit
OBES	Open Bodemenergiesystemen
RCP	Representative Concentration Pathways: Dit zijn enkele scenario's die de ontwikkeling van broeikasgassen beschrijven
RWZI	Rioolwaterzuiveringen
SDL	Slecht Doorlatende Lagen

SEAWAT	Computer programma om drie-dimensionale variabele dichtheidsstroming te berekenen, bijvoorbeeld voor zoet, brak en zout grondwater.
STRONG	Strukturvisie Ondergrond
ThermoGIS	Openbaar, web-based geografisch informatie systeem dat de regionale potentie van geothermie weergeeft in Nederland aan hand van een aantal kaarten van de ondergrond.
VEWIN	Vereniging van drinkwaterbedrijven in Nederland
WVP	Watervoerendpakket
WL en WH	Klimaatscenario's Warm lage waarde en Warm hoge waarde
ZZ-grensvlak	zoet-zout of zoet-brak grensvlak

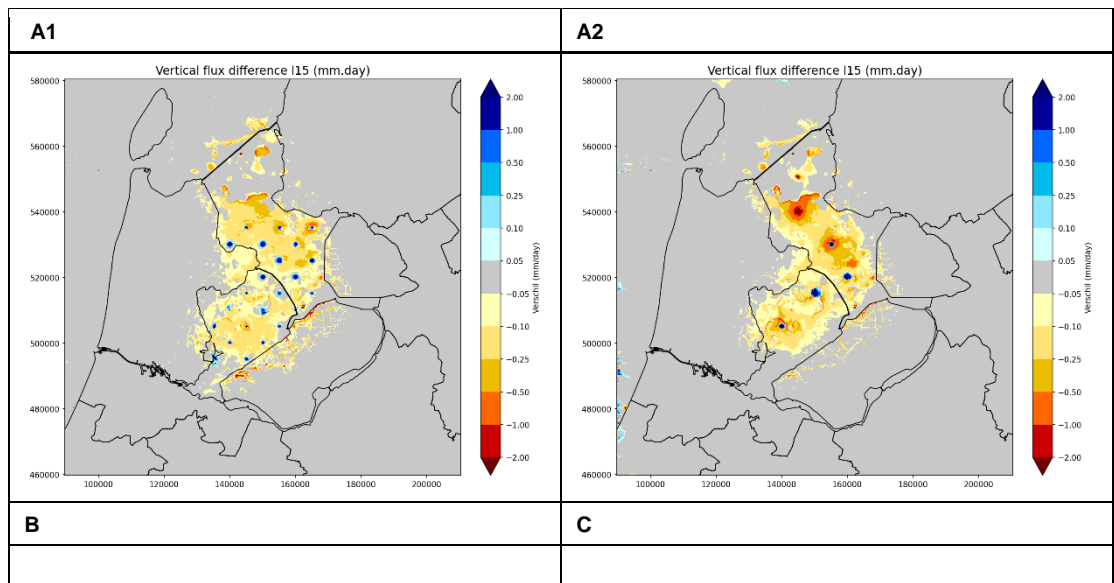
## B Schematisatie onttrekkingen IJsselmeer

ld	x	y	Top (m-mv)	Bottom (m-mv)	Aanwezig in scenario
5	135125	495125	-16.84	-26.84	A1
7	135125	505125	-20.93	-30.93	A1
10	135125	545125	-8.78	-18.78	B
13	140125	500125	-19.41	-29.41	A1
14	140125	505125	-18.39	-28.39	A2
15	140125	510125	-17.96	-27.96	A1
17	140125	530125	-14.38	-24.38	A1 & B
19	140125	540125			A1
21	140125	550125	-21.90	-31.90	A1
23	145125	495125	-20.80	-30.80	A1 & B
25	145125	505125	-28.16	-38.16	A1
26	145125	510125	-16.23	-26.23	C
27	145125	515125	-16.25	-26.25	A1
30	145125	535125	-10.37	-20.37	A1
31	145125	540125	-12.96	-22.96	A2
32	145125	545125	-23.06	-33.06	A1
33	145125	550125	-21.96	-31.96	A2
34	145125	555125	-48.77	-55.05	A1
36	150125	500125	-18.16	-28.16	A1 & B
38	150125	510125	-18.25	-28.25	A1
39	150125	515125	-15.40	-23.78	A2
40	150125	520125	-16.12	-23.46	A1
42	150125	530125	-13.44	-23.44	A1
43	150125	535125	-11.70	-21.70	C
44	150125	540125	-251.27	-261.27	A1
46	150125	550125	-27.63	-37.63	A1
48	150125	560125	-52.84	-62.84	A1
49	155125	505125	-18.93	-28.93	A1
51	155125	515125	-19.66	-29.66	A1
53	155125	525125	-13.27	-23.27	A1
54	155125	530125	-11.40	-21.40	A2
55	155125	535125	-11.17	-21.17	A1
61	160125	510125	-17.36	-27.36	A1 & B
63	160125	520125	-13.58	-22.00	A1 & A2
65	160125	530125	-10.73	-20.73	A1
68	165125	515125	-14.47	-24.47	A1
69	165125	520125	-13.72	-23.72	B
70	165125	525125	-10.24	-19.68	A1
72	165125	535125	-12.55	-22.55	A1 & B

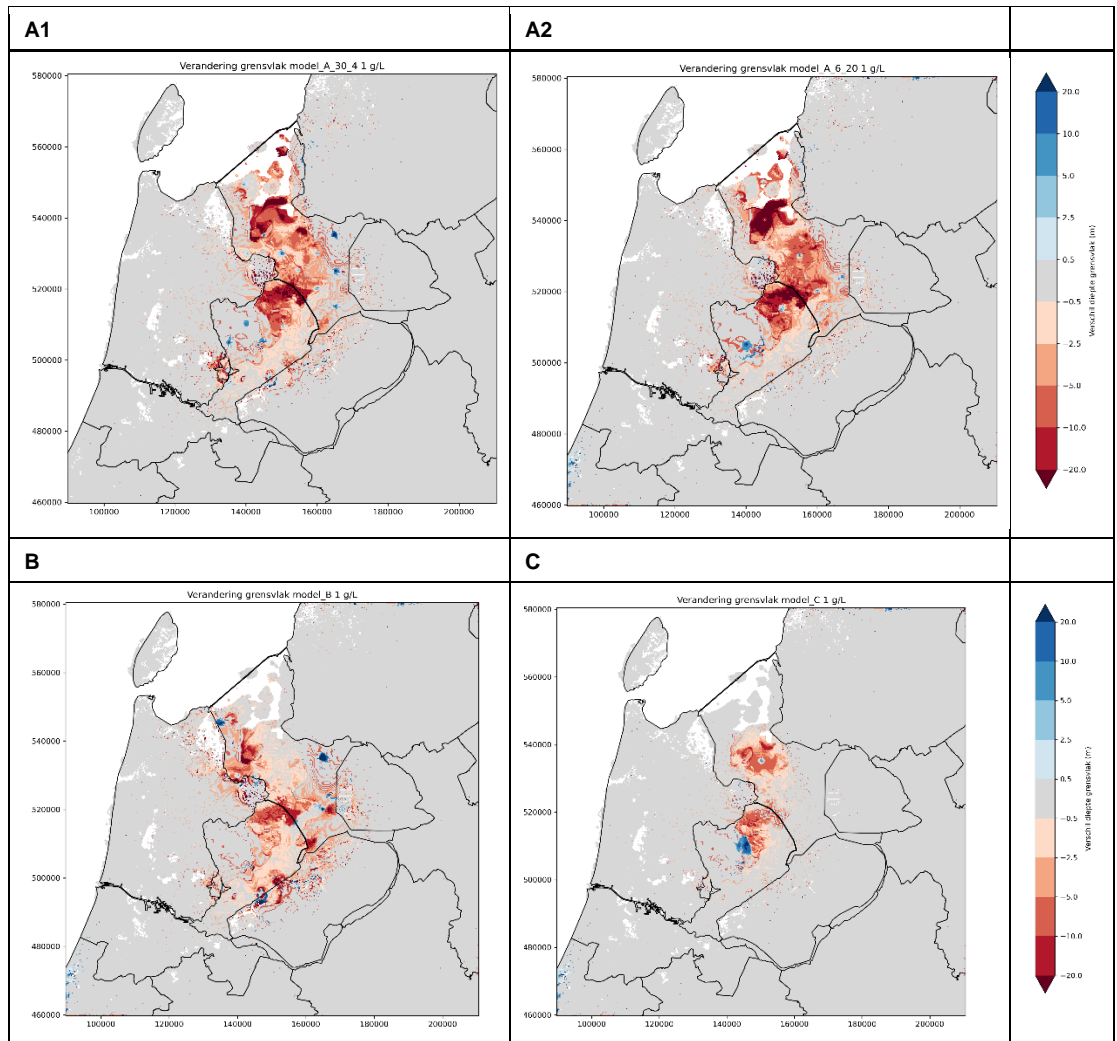
# C Extra resultaten voor IJsselmeer



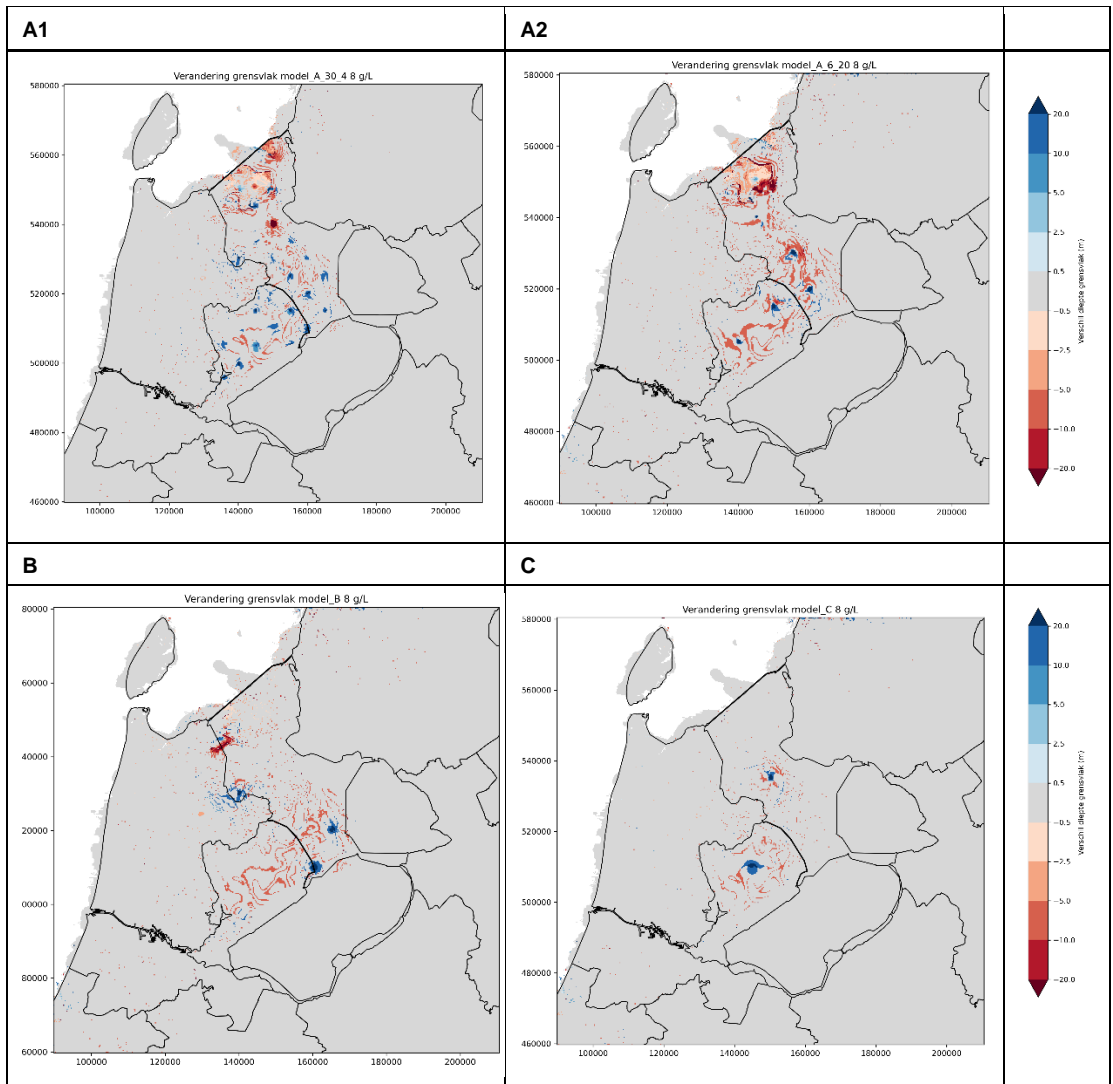
Figuur 6.1 Effect van grondwaterwinningen op de verticale flux vanuit het eerste watervoerende pakket naar de deklaag (flux over modellaag 10) in mm/dag, na 50 jaar grondwater onttrekken.



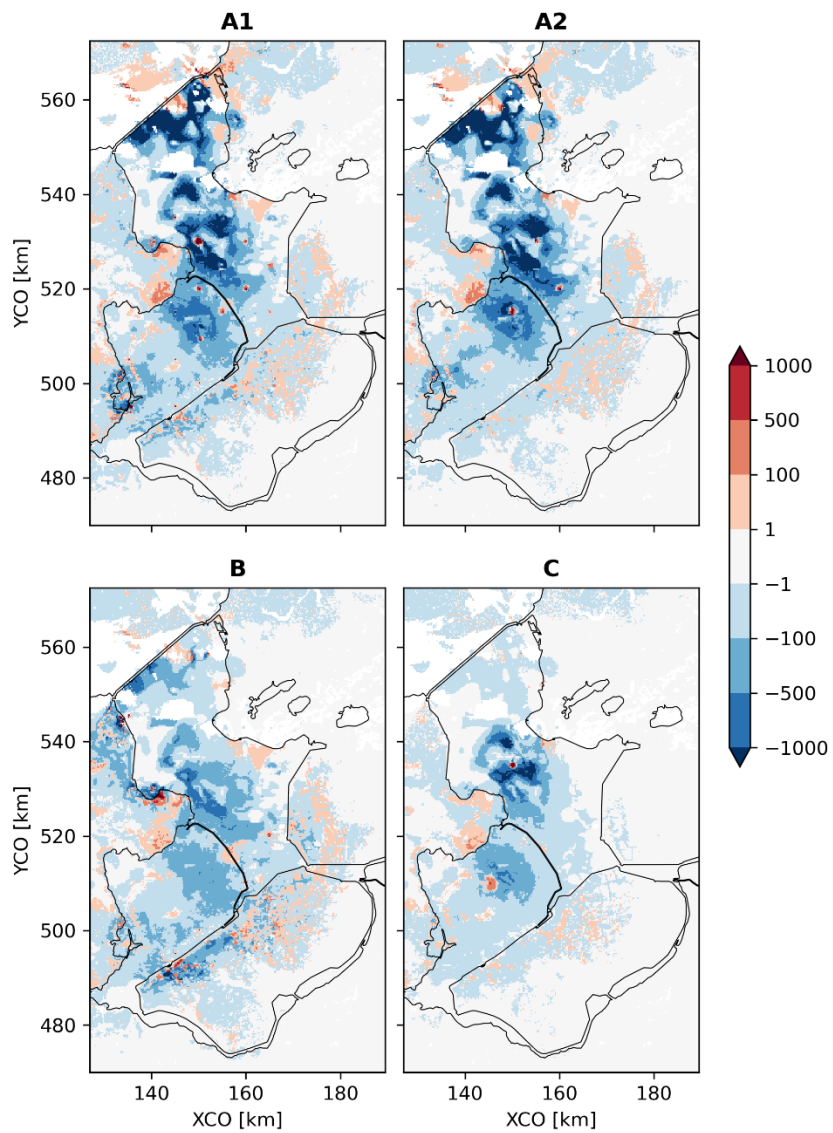
Figuur 6.2 Effect van grondwaterwinningen op de verticale flux over de tweede weerstand biedende laag (modellaag 15) in mm/dag, na 50 jaar grondwater onttrekken.



Figuur 6.3. Verandering in het zoet-zout grensvlak van 1 g/L ten opzichte van huidige situatie. Blauwe kleuren tonen een stijging van het zoet-zout grensvlak en rode kleuren een daling.

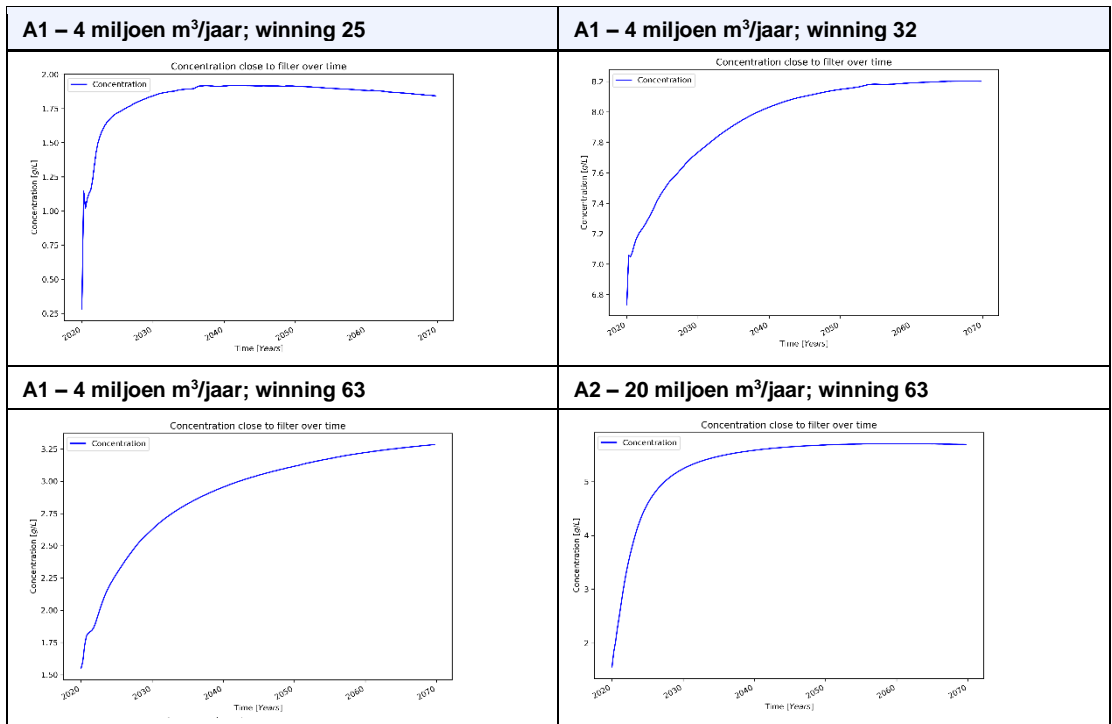


Figuur 6.4. Verandering in het zoet-zout grensvlak van 8 g/L ten opzichte van huidige situatie. Blauwe kleuren tonen een stijging van het zoet-zout grensvlak en rode kleuren een daling.



Figuur 6.5 Verandering van chloride gehalte (mg Cl/L) in WVP1 ten opzichte van de huidige



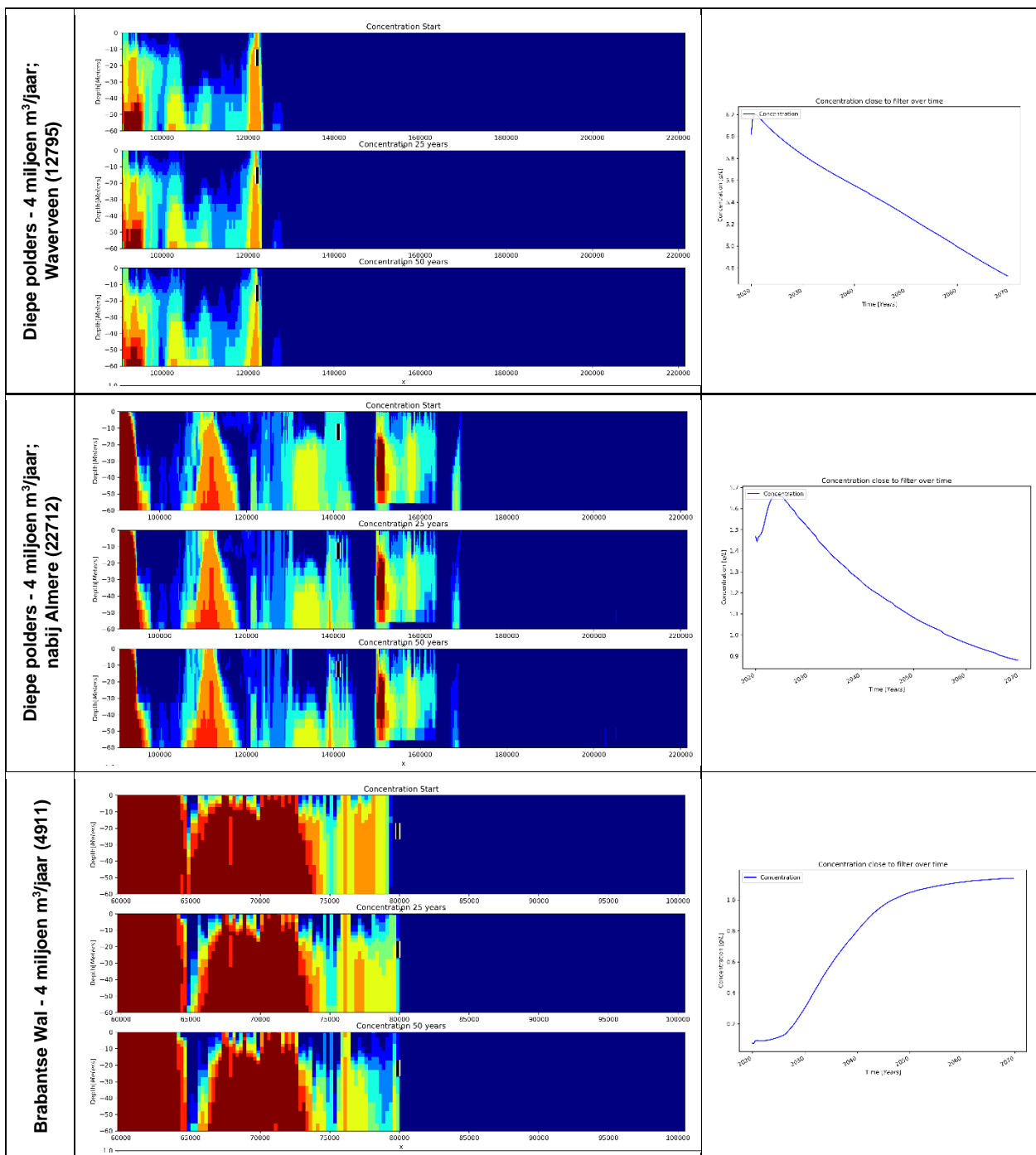


Figur 6.6 Chloride concentratie [g/L] nabij filter.

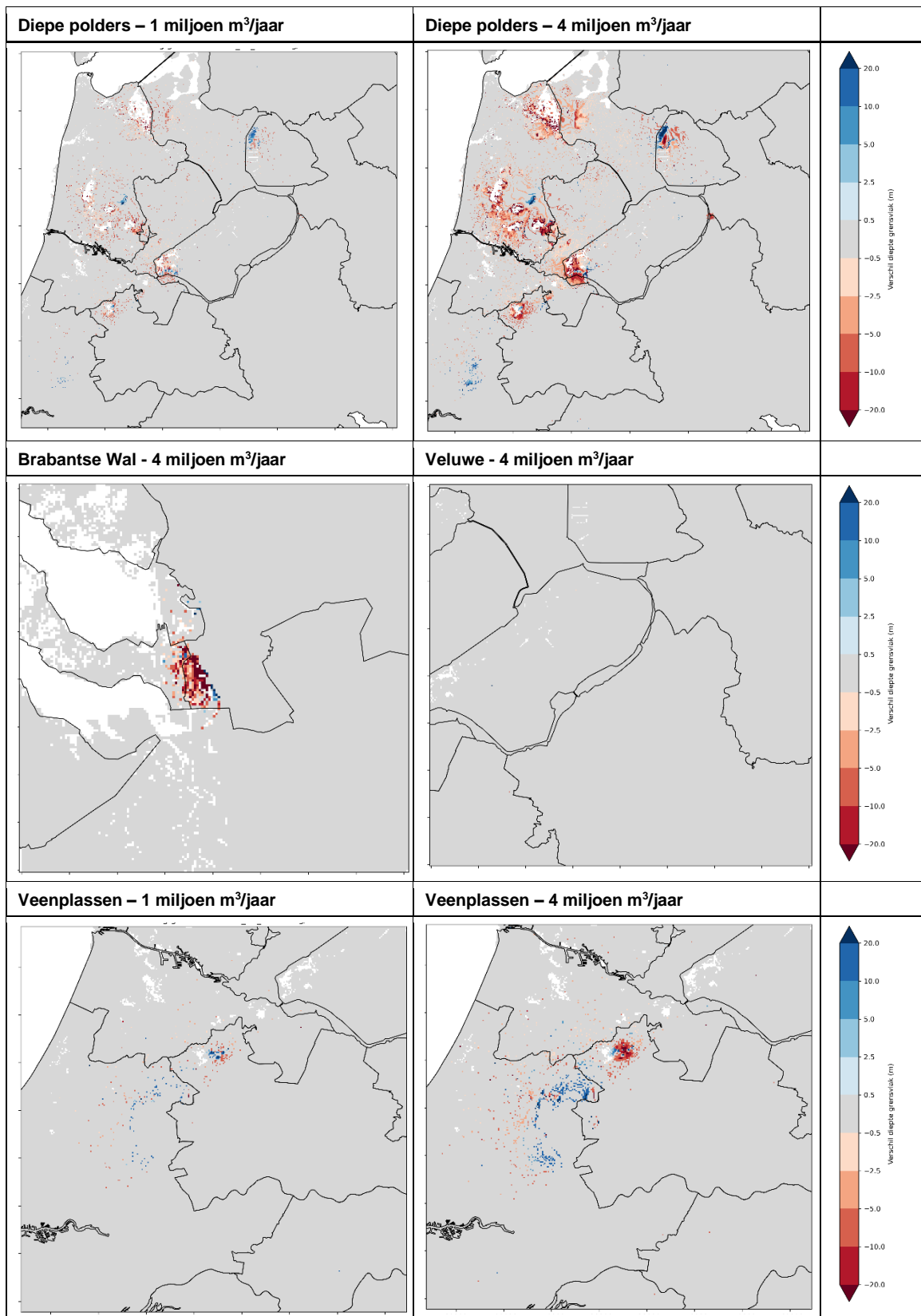
## D Schematisatie onttrekkingen kwel



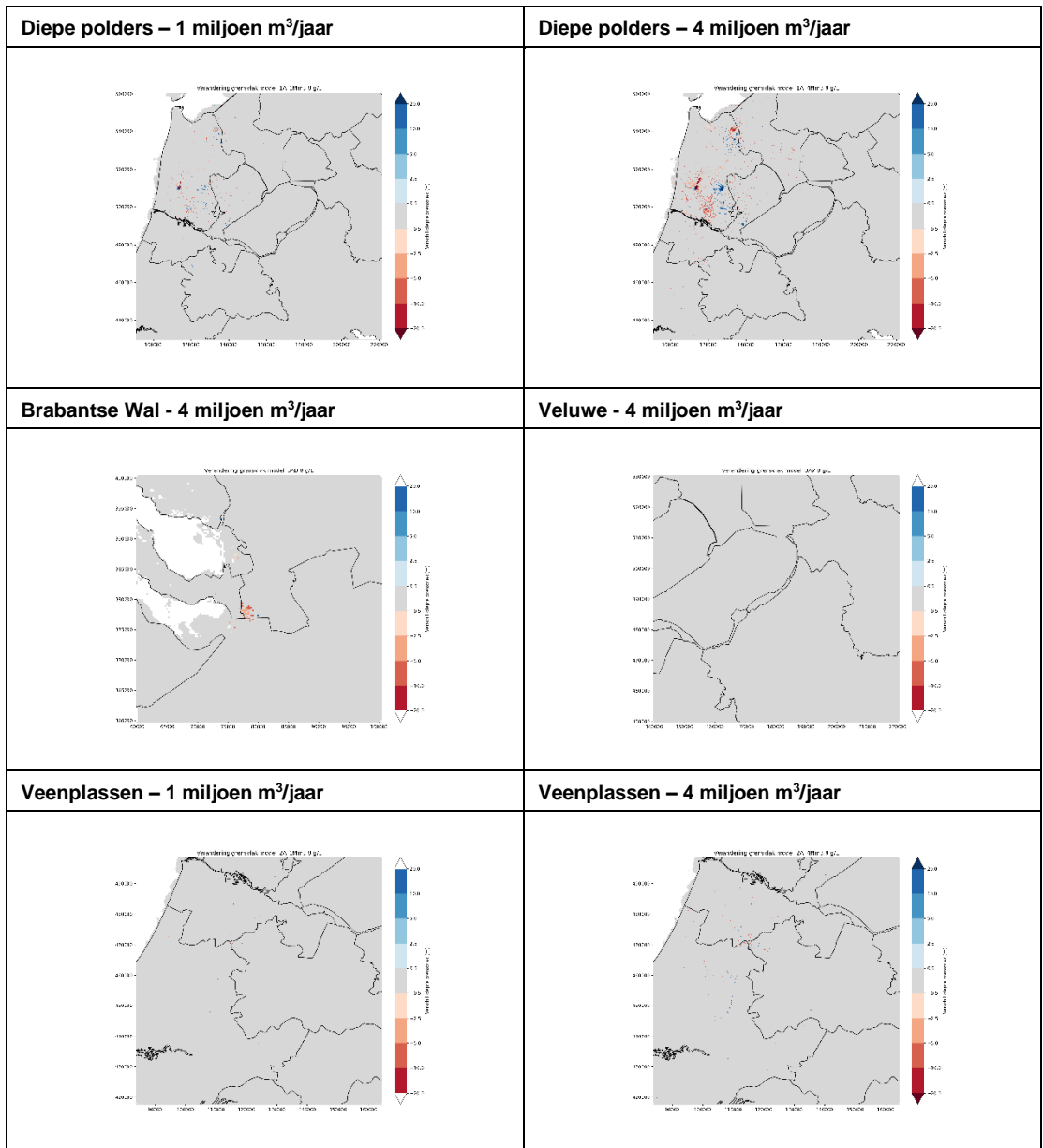
# E Extra resultaten voor kwel



Figuur 6.7 Chloride-concentratie verdeling [g/L] voor 3 momenten in de tijd, namelijk huidig, na 25 jaar en na 50 jaar (links) en chloride-concentratie [g/L] verdeling over tijd nabij onttrekkingsput (rechts), voor 3 locaties.



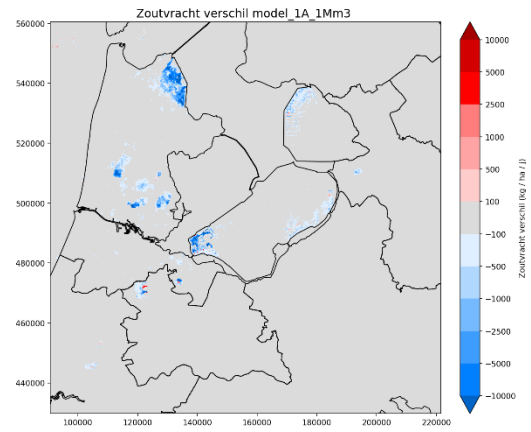
Figuur 6.8 Verandering in het zoet-zout grensvlak van 1 g/L ten opzichte van huidige situatie, na 50 jaar grondwater onttrekken. Blauwe kleuren tonen een stijging van het zoet-zout grensvlak en rode kleuren een daling. Zie bijlage C voor verandering in het zoet-zout grensvlak van 8 g/L.



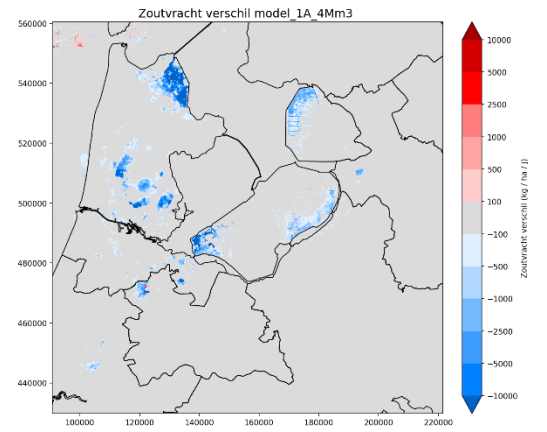
*Figuur 6.9 Verandering in het zoet-zout grensvlak van 8 g/L ten opzichte van huidige situatie, na 50 jaar grondwater onttrekken. Blauwe kleuren tonen een stijging van het zoet-zout grensvlak en rode kleuren een daling.*

## Zoutverdeling

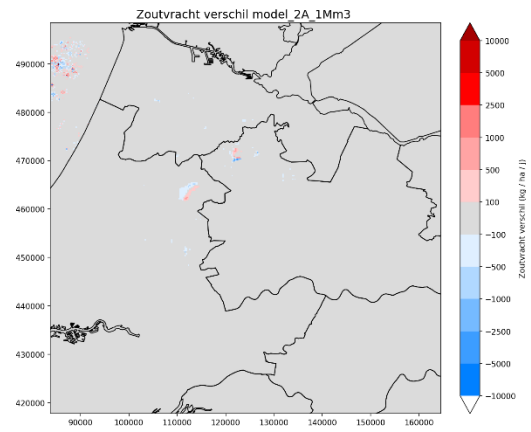
**1A – 1Mm3**



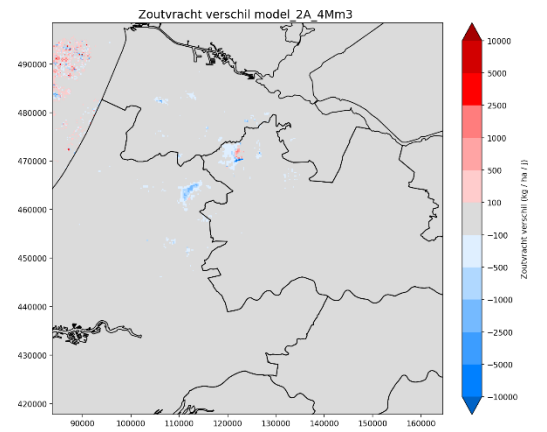
**1A – 4Mm3**



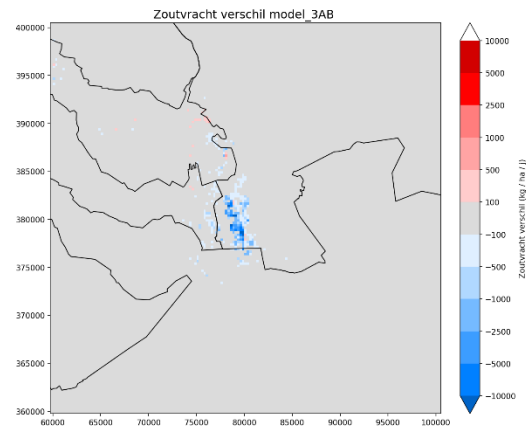
**2A – 1Mm3**



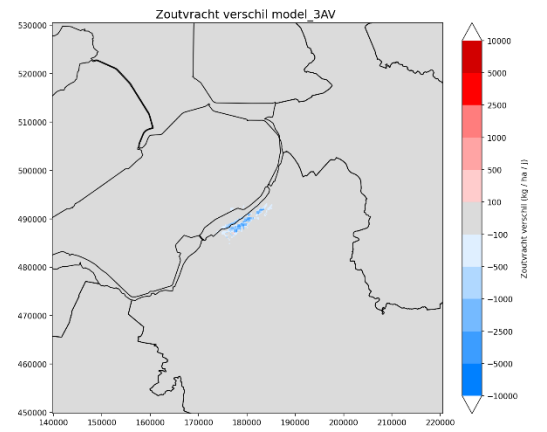
**2A – 4Mm3**

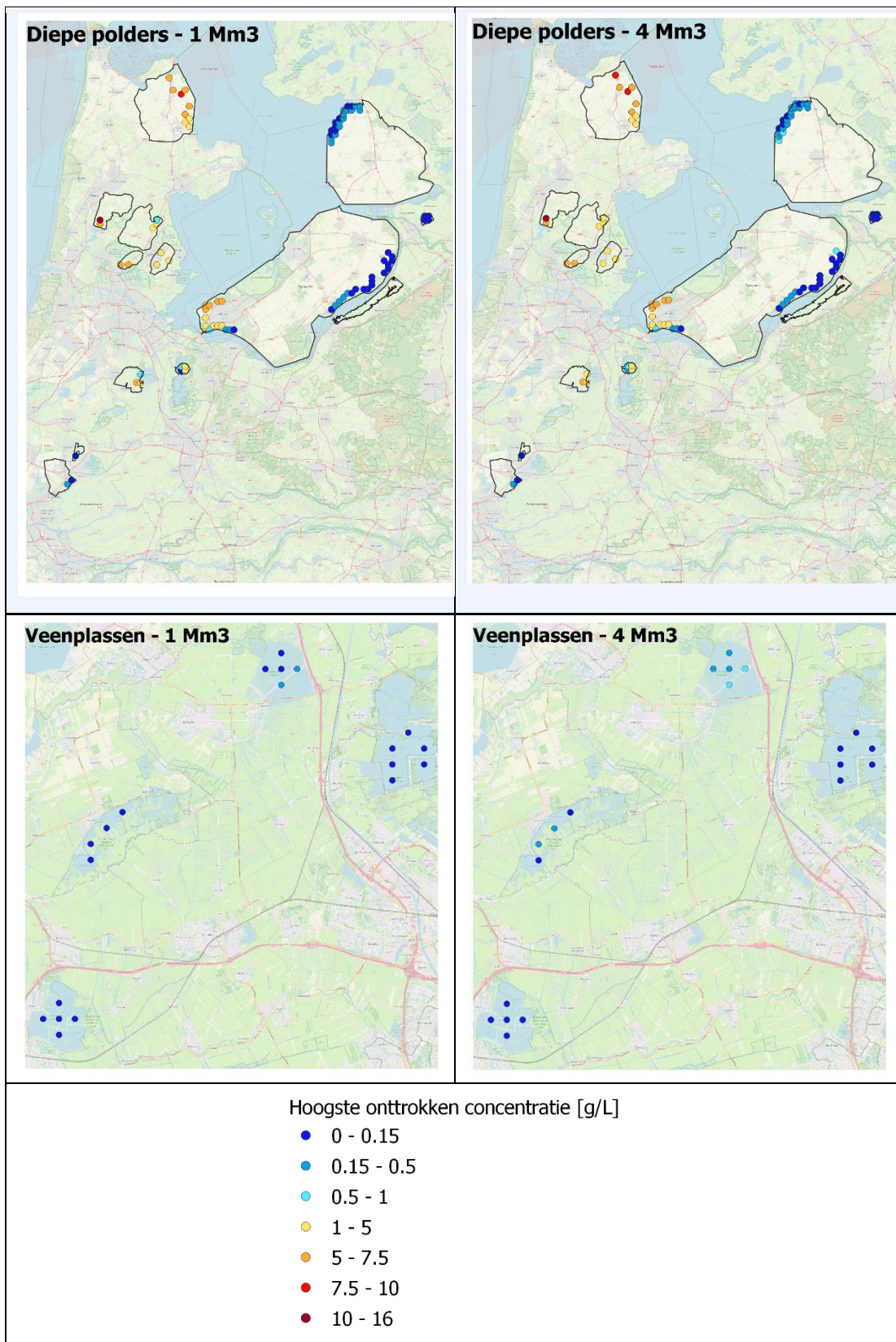


**3A – Brabantse Wal**



**3A - Veluwe**





Figuur 6.10 Maximale concentratie van onttrokken water [g/L]

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)