

Verkenning geohydrologische effecten Voorraadbekken IJsselmeer



Verkenning geohydrologische effecten Voorraadbekken IJsselmeer

Auteur(s)

Joost Delsman

Tobias Mulder

Verkenning geohydrologische effecten Voorraadbekken IJsselmeer




Opdrachtgever	PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland NV
Contactpersoon	de heer K. Zuurbier

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	30-06-2021
Projectnummer	11207141-002
Document ID	11207141-002-BGS-0001
Pagina's	55
Classificatie	Vertrouwelijk tot 30 juni 2026
Status	definitief

Auteur(s)

	Joost Delsman	
	Tobias Mulder	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	 Joost Delsman	 Gualbert Oude Essink	 Otto de Keizer	
	Tobias Mulder			

Samenvatting

Drinkwaterbedrijf PWN verkent verschillende mogelijkheden om de drinkwatervoorziening in hun beheersgebied toekomstbestendig te maken. Als één van de alternatieven verkent PWN de aanleg van een voorraad- en kwaliteitsbekken voor de opslag van oppervlaktewater in het IJsselmeer. Een dergelijk bekken kan een significant effect hebben op de grondwatersituatie in het IJsselmeer. In deze studie worden de geohydrologische implicaties van verschillende mogelijke varianten van een voorraad- en kwaliteitsbekken in het IJsselmeer onderzocht.

Met behulp van uitsneden uit het landsdekkende 3D LHM zoet-zout model zijn verkennende berekeningen gedaan naar de geohydrologische effecten van de aanleg van een voorraadbekken op vier mogelijke locaties in het IJsselmeer. De onderzochte voorraadbekken zijn elk 15 m diep, doorsnijden zodoende de deklaag onder het IJsselmeer, en kennen een cyclisch waterpeilverloop, variërend tussen -0.3 en -5.3 m NAP, dat het beoogde gebruik van het bekken simuleert. In een drietal vervolgsenario's is voor één van de locaties gekeken naar verschillende mogelijke waterpeilfluctuaties.

De berekeningsresultaten van de basisscenario's laten duidelijke verschillen zien tussen de verkende locaties, die samenhangen met de regionale stijghoogtegradiënt in het watervoerende pakket en de weerstand van de deklaag onder het IJsselmeer ter plaatse van de locatie van het bekken. De interactie van het voorraadbekken met het grondwater op de locaties is afhankelijk van het opgelegde waterpeilverloop. Bij regulier peil zijgt er uit alle bekkens water weg, bij maximale uitzakking trekken alle bekkens grondwater aan. De verhouding tussen beide processen bepaalt op lange termijn of de bekkens verzilting laten zien.

Locatie 1 wordt gekenmerkt door een lage weerstand onder het IJsselmeer, en een regionale grondwaterstroming richting de Wieringermeerpolder. Ondanks de nabijheid van ondiep zout grondwater ligt de gekozen locatie in een zoete grondwaterstroming richting de Wieringermeerpolder en blijft daardoor zoet. Locatie 2 ligt nabij de huidige spaarbekken van PWN bij Andijk. In het basisscenario voor deze locatie is de stijghoogtegradiënt beperkt, waardoor het bekken in de berekeningen netto grondwater aantrekt. Het grondwater in de omgeving is brak, het bekken verzilt dan ook snel. Locatie 3 ligt aan de Markerwaarddijk. De stijghoogtegradiënt op deze locatie is sterker dan voor locatie 2. Netto trekt dit bekken in de berekeningen nog grondwater aan en verzilt over de modelperiode van 50 jaar. Locatie 4 ligt dicht bij de Noordoost- en Flevopolder en kent de sterkste stijghoogtegradiënt. Bij normale vullingsgraad en netto over een waterpeilcyclus zijgt er dan ook een flinke hoeveelheid water weg uit dit bekken. Het bekken blijft volledig bestaan uit ingenomen oppervlaktewater. Opbarsten van de onderliggende Eemklei laag lijkt voor de locaties 2, 3 en 4 niet aan de orde; op locatie 1 wordt een rand van de Eemklei door het bekken aangesneden en is er risico op opbarsten.

In vervolgsenario's is verder gekeken naar locatie 2. Hierbij is de deklaagweerstand onder het IJsselmeer in de berekeningen verhoogd, waardoor de berekende stijghoogte in het eerste watervoerende pakket meer in lijn is met de door PWN gemeten stijghoogte. Waar het oorspronkelijke waterpeilverloop (regulier -0.3 m NAP, elke vijf jaar uitzakking tot -5.3 m NAP) nog tot verzilting van het bekken leidt, lijkt dit te voorkomen door ofwel het peil minder uit te laten zakken, ofwel het waterpeil regulier hoger op te zetten. In het laatste geval wordt het grondwater als buffer gebruikt, waarbij eerder geïnfilteerd 'bekkenwater' bij peiluitzakking weer terugstroomt in het voorraadbekken. Het hoger opzetten van het reguliere peil gaat wel

gepaard met een significant verlies aan water door wegzijging naar het watervoerende pakket.

Deze studie heeft een sterk verkennend karakter. In de modelontwikkeling zijn pragmatische aannamen gedaan, zoals de aanname dat de hydraulische weerstand in het bekken niet toeneemt. Er is gebruik gemaakt van uitsneden uit het LHM zoet-zout model versie 4.0, waarvoor juist voor het IJsselmeergebied herziening van de schematisatie wordt aanbevolen. Voor de basisscenario's heeft geen kalibratie of validatie van het model plaatsgevonden, voor de vervolgsenario's rond locatie 2 is er slechts een grove aanpassing gedaan. Daarbij komt dat de gerapporteerde resultaten sterk afhankelijk zijn van de berekende stijghoogtegradiënt, en het gehanteerde waterpeilverloop. De gerapporteerde berekeningsresultaten moeten dan ook in dit licht worden beschouwd.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Onderzoeksvragen	8
1.3	Mogelijke locaties	8
2	Methode	10
2.1	Aanpak	10
2.1.1	Aannames	10
2.1.2	Modellering	10
2.2	Scenario's	12
2.2.1	Basisscenario's	12
2.2.2	Vervolgscenario's	12
2.2.2.1	Kalibratie	13
2.2.2.2	Scenario's	13
3	Resultaten	14
3.1	Basisscenario's	14
3.1.1	Stijghoogte	14
3.1.2	Wegzijgingsflux	14
3.1.3	Samenstelling bekkenwater	15
3.1.4	Opbarstrisico Eemklei	16
3.2	Vervolgscenario's voor locatie 2	17
3.2.1	Stijghoogte	17
3.2.2	Wegzijgingsflux	18
3.2.3	Samenstelling bekkenwater	19
3.2.4	Opbarstrisico Eemklei	20
4	Discussie en conclusies	21
5	Referenties	23
A	Resultaten basisscenario's	24
A.1	Basisscenario - locatie 1	24
A.1.1	Stijghoogte	24
A.1.2	Verandering zoet-zoutverdeling	25
A.1.3	Uitwisseling voorraadbekken en grondwater	26
A.1.4	Samenstelling water in het voorraadbekken	27
A.1.5	Opbarstrisico Eemklei	27
A.2	Basisscenario - locatie 2	28
A.2.1	Stijghoogte	28
A.2.2	Verandering zoet-zoutverdeling	29
A.2.3	Uitwisseling voorraadbekken en grondwater	30
A.2.4	Samenstelling water in het voorraadbekken	31

A.2.5	Opbarstrisico Eemklei	31
A.3	Basisscenario - locatie 3	32
A.3.1	Stijghoogte	32
A.3.2	Verandering zoet-zoutverdeling	33
A.3.3	Uitwisseling voorraadbekken en grondwater	34
A.3.4	Samenstelling water in het voorraadbekken	35
A.3.5	Opbarstrisico Eemklei	35
A.4	Basisscenario - locatie 4	36
A.4.1	Stijghoogte	36
A.4.2	Verandering zoet-zoutverdeling	37
A.4.3	Uitwisseling voorraadbekken en grondwater	38
A.4.4	Samenstelling water in het voorraadbekken	39
A.4.5	Opbarstrisico Eemklei	40
B	Resultaten vervolgsenario's	41
B.1	Referentieberekening vervolgsenario's	41
B.2	Vervolgsenario locatie 2 – regulier -0.3 m, maximaal -5.3 m NAP	41
B.2.1	Stijghoogte	41
B.2.2	Verandering zoet-zoutverdeling	42
B.2.3	Uitwisseling voorraadbekken en grondwater	43
B.2.4	Samenstelling water in het voorraadbekken	44
B.2.5	Opbarstrisico Eemklei	44
B.3	Vervolgsenario locatie 2 – regulier -0.3 m, maximaal -1.0 m NAP	45
B.3.1	Stijghoogte	45
B.3.2	Verandering zoet-zoutverdeling	45
B.3.3	Uitwisseling voorraadbekken en grondwater	46
B.3.4	Samenstelling water in het voorraadbekken	47
B.3.5	Opbarstrisico Eemklei	47
B.4	Vervolgsenario locatie 2 – regulier +0.5 m, maximaal -3.0 m NAP	48
B.4.1	Stijghoogte	48
B.4.2	Verandering zoet-zoutverdeling	49
B.4.3	Uitwisseling voorraadbekken en grondwater	50
B.4.4	Samenstelling water in het voorraadbekken	50
B.4.5	Opbarstrisico Eemklei	51
C	Inspelen zoet-zoutverdeling IJsselmeer	52

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Drinkwaterbedrijf PWN verkent verschillende mogelijkheden om de drinkwatervoorziening in hun beheersgebied toekomstbestendig te maken. Als één van de alternatieven verkent PWN de aanleg van een voorraad- en kwaliteitsbekken in het IJsselmeer. In een dergelijk bekken kan ingenomen oppervlaktewater worden gebufferd, waarbij de kwaliteit op natuurlijke wijze al verbetert. Het gaat hierbij om een diep bekken, waarbij het waterpeil in het voorraadbekken enkele meters kan uitzakken onder het IJsselmeerpeil. Een dergelijk bekken kan een significant effect hebben op de grondwatersituatie in het IJsselmeer.

1.2 Onderzoeksvragen

Voor dit onderzoek zijn de volgende onderzoeksvragen gedefinieerd.

Rond wegzijging:

1. Hoeveel wegzijging is ongeveer te verwachten? Aanname: geen verstopping nog van de bodem / oever en dus geen weerstand om te infiltreren in het onderliggende zand.
2. Waar blijft het ingebrachte water? Hoe dik wordt de zoetwaterlens; drijft het zoete water zijwaarts, of blijft het drijven bovenop het zoutere grondwater?

Rond wateropslag:

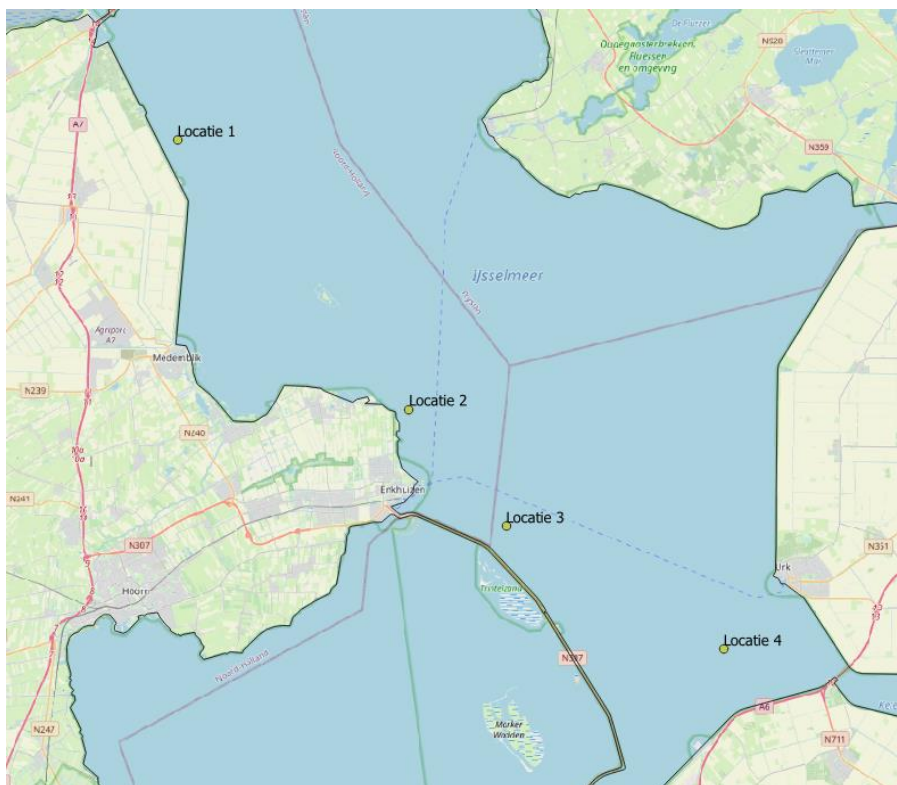
3. Wanneer het bekken langdurig niet wordt aangevuld, wat gebeurt er dan met:
 - a. het waterpeil in het bekken: hoe snel zakt dit uit?
 - b. het eventueel onderliggende zoutere grondwater: treedt dit het bekken binnen?

Rond terugwinning:

4. Hoeveel uitzakking is mogelijk zonder opbarstingsrisico van de Eemklei? (alleen waar Eemklei aanwezig is)
5. Is er risico op het terugkomen van zouter grondwater doordat ingebracht zoetwater zijwaarts is afgedreven en/of door opkegeling van diepe zouter grondwater?
6. Of wordt juist geprofiteerd van het in de ondergrond gebracht volume zoetwater (dat door wegzijging is gecreëerd)?

1.3 Mogelijke locaties

Figuur 1 geeft de locaties die door PWN zijn aangemerkt als te verkennen locaties voor een voorraadbekken.



Figuur 1 Mogelijke locaties voorraad- en kwaliteitsbekken in het IJsselmeer (bron: PWN).

2 Methode

Gezien het korte tijdpad van de verkenning is in deze studie uitgegaan van het bestaande LHM zoet-zout 4.0 model (Delsman et al., 2020). Het LHM zoet-zout 4.0 is een Nederland-dekkend, driedimensionaal zoet-zout grondwaterstromings- en -transportmodel. De aanwezige zoet-zoutverschillen in het grondwater in het IJsselmeergebied hebben effect op de stroming van het grondwater. Rekenen met een zoet-zout grondwatermodel zoals het LHM zoet-zout is in dit gebied dan ook noodzakelijk. Er wordt momenteel gewerkt aan een update van het LHM zoet-zout model, waarin een aanpassing wordt gedaan van de deklaagweerstand in het IJsselmeergebied (zie de rapportage van LHM 4.1 (Janssen et al., 2020)). Deze aanpassing komt te laat gereed voor deze studie. De mogelijke implicaties van deze aanpassing worden bediscussieerd in hoofdstuk 4.

2.1 Aanpak

2.1.1 Aannames

De volgende aannames zijn gedaan voor het ontwerp en gebruik van het voorraadbekken. Deze aannames zijn gebaseerd op huidige inzichten van PWN:

- Het bekken is ca 500 hectare groot en ovaalvormig. In de modellering is een rechthoekig bekken aangenomen van 2000m bij 2500m.
- Het bekken heeft in reguliere situaties een peil gelijk aan het IJsselmeerpeil (-0.3 m NAP jaargemiddeld).
- Bij benutting kan het peil uitzakken tot ca. 5 m onder het IJsselmeerpeil. De kortste periode waarin dit kan plaatshebben is 3 maanden.
- Het bekken wordt in de 1.5 jaar daarvoor dan al niet meer op peil gehouden. Het waterpeil in het bekken zal in evenwicht komen met de stijghoogte van het omliggende grondwater.
- Het bekken is 15 m diep ten behoeve van natuurlijke zuivering / behoud van kwaliteit.

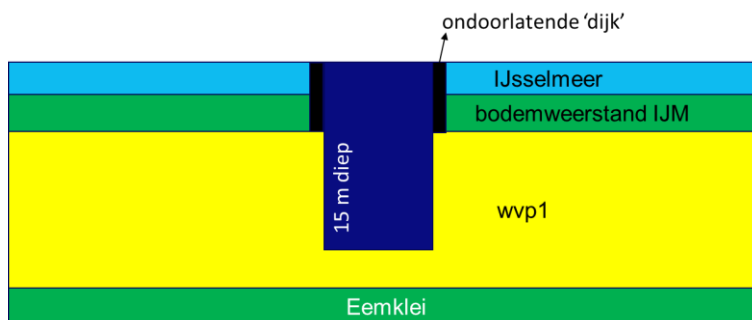
2.1.2 Modelling

1. Er wordt een uitsnede uit het LHM zoet-zout gemaakt waarin alle mogelijke locaties zijn opgenomen, het 'IJsselmeemodel'.
2. Het 'IJsselmeemodel' wordt 50 jaar ingespeeld, waardoor de zoet-zout verdeling in het IJsselmeer de huidige situatie naar verwachting beter beschrijft. De zoet-zoutverdeling onder het IJsselmeer is namelijk hoofdzakelijk gebaseerd op een meetcampagne die heeft plaatsgevonden in de jaren 1970. Het 'IJsselmeemodel' wordt vervolgens nog 50 jaar gedraaid om randvoorwaarden voor de deelmodellen te genereren (totaal 100 jaar).
3. Voor de vier locaties:
 - a. Wordt per locatie een kleiner deelmodel uit dit IJsselmeemodel gesneden. De temporele resolutie van dit model wordt verhoogd naar maandelijks, overigens zonder randvoorwaarden (bijvoorbeeld zomer-winterpeil variatie in het IJsselmeer of de polders) aan te passen.
 - b. Op de in Figuur 1 aangegeven locaties wordt een bekken in het model opgenomen van 15 m diep en 500 ha groot. Dit betreft 80 modelcellen. Het bekken doorsnijdt de deklaag, en wordt opgenomen als een bekken met een hoge doorlatendheid en een porositeit van 1 (Figuur 2). Het bekken omspant verschillende modellagen. De laagdikten worden ter plaatse van het bekken zo aangepast dat één laaggrens samenvalt met de beoogde diepte van 15 m. Er wordt geen additionele weerstand aangenomen tussen het bekken en het grondwatersysteem. Wel wordt een ondoorlatende laag van 1 cel rondom

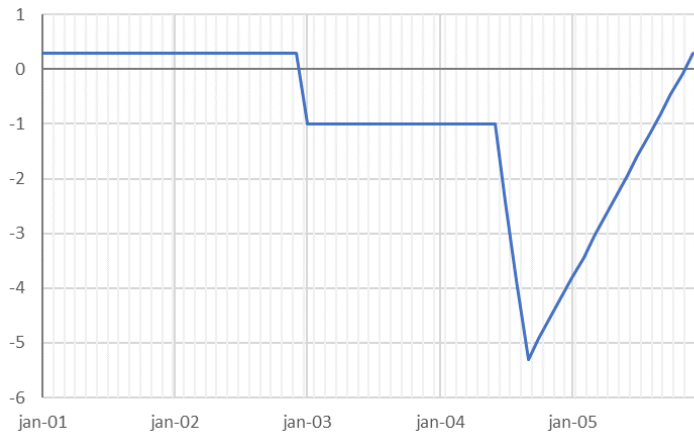
het bekken aangenomen in de deklaag, om directe instroming van IJsselmeerwater te voorkomen. Het waterpeil wordt ingesteld met een bovenrandvoorwaarde op het bekken. Voor deze verkennende fase wordt geen rekening gehouden met een variërend doorlaatvermogen bij waterpeilvariatie.

- c. Vervolgens wordt een langjarige tijdserie (50 jaar) doorgerekend, waarbij een maandelijkse waterpeilvariatie in het bekken wordt opgelegd.
- d. Deze waterpeilvariatie is als een herhalende vijfjarige cyclus opgelegd. Het peilverloop is als volgt (Figuur 3):
 - i. twee jaar regulier peil (-0.3 m NAP),
 - ii. een jaar en zes maanden geen aanvulling, peil komt in evenwicht met stijghoogte watervoerend pakket (in model: weerstand GHB randvoorwaarde erg groot),
 - iii. drie maanden uitzakking tot maximale uitzakking (-5.3 m NAP),
 - iv. vijftien maanden herstel waterpeil tot regulier peil.
- e. Met behulp van conservatieve modeltracers wordt de verspreiding van water in het bekken, elders infiltrerend IJsselmeerwater en het omliggende grondwater gesimuleerd.
- f. De resultaten worden geanalyseerd voor wat betreft:
 - i. in- en uitstroomflux bij verschillende waterpeilen (beantwoordt vragen 1, 3a)
 - ii. verspreiding van 'bekkenwater' in het omliggende watervoerende pakket (beantwoordt vragen 2, 5, 6).
 - iii. veranderende samenstelling water in bekken qua herkomst en zoutgehalte (beantwoordt vragen 3b, 5, 6).
 - iv. de opbarstindex van de Eemklei ter plaatse van het bekken bij volledig uitgezakt waterpeil. De opbarstindex is het quotiënt van de grondspanning (gewicht bovenliggende grond en water) versus de waterspanning (kweldruk door de Eemklei). Bij een opbarstindex > 1.1 is risico op opbarsten klein. (beantwoordt vraag 4)

Voor de berekening van de opbarstindex is een vereenvoudigde lithologische opbouw aangenomen, waarbij de deklaag en Eemklei als volledig klei (verzadigd volumiek gewicht 1400 kg/m^3) worden gezien, en het watervoerend pakket als volledig zand (verzadigd volumiek gewicht 2100 kg/m^3). De dikten van de lagen is overgenomen uit de laagopbouw van het LHM zoet-zout, wat op zijn beurt is gebaseerd op REGIS 2.2.



Figuur 2 Concept modelimplementatie voorraadbekken.

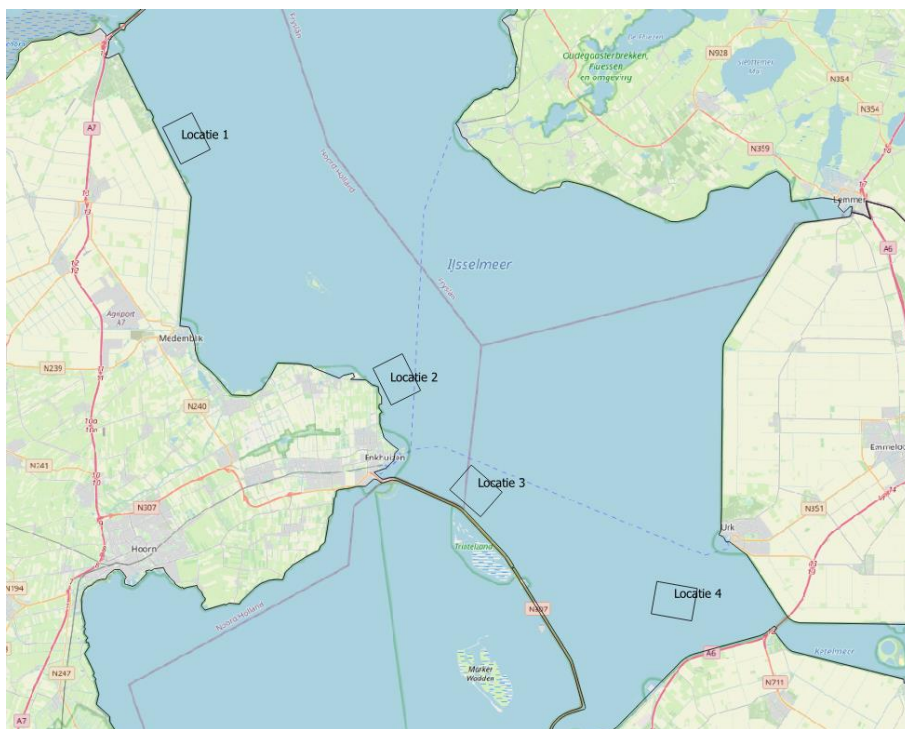


Figuur 3 Waterpeilverloop over de tijd bij een regulier waterpeil van -0.3 m NAP, en een stijghoogte in het watervoerende pakket van -1 m NAP. De maximale uitzakking is tot -5.3 m NAP. Merk op dat de randvoorwaarden in het model stapsgewijs (maandelijke tijdstappen) worden opgegeven.

2.2 Scenario's

2.2.1 Basisscenario's

In de basisscenario's is voor de vier mogelijke bekkenlocaties (Figuur 4) de aanpak gevolgd zoals beschreven in 2.1.2.



Figuur 4 Gemodelleerde locaties voorraadbekken.

2.2.2 Vervolgscenario's

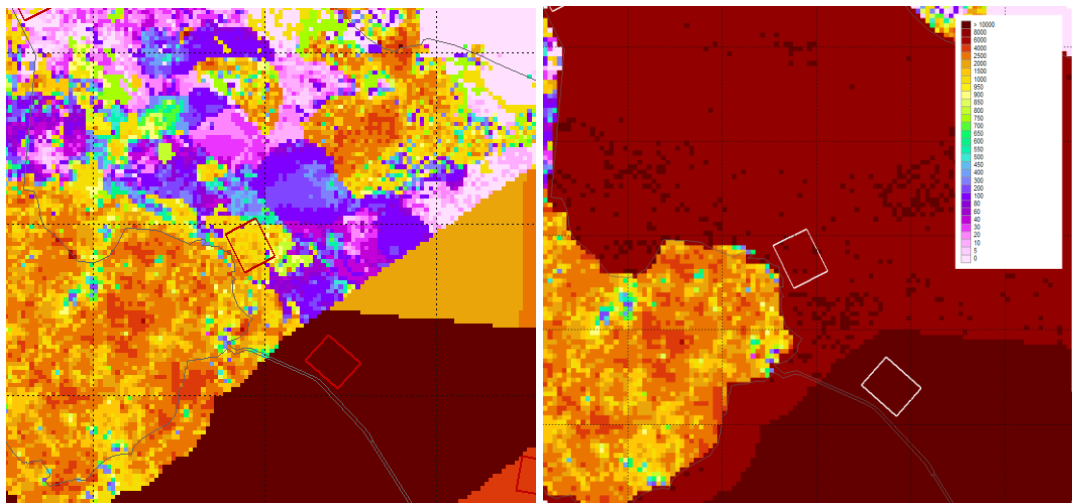
In overleg met PWN is vervolgens locatie 2 verder onderzocht. Deze locatie kwam in de basisscenario's als ongunstig naar voren, door de sterke toestroom van grondwater naar het bekken tijdens uitzakkingsperiodes. Tegelijkertijd is dit een gunstige locatie voor PWN, gezien de nabijheid van reeds bestaande bekkenen en infrastructuur. In deze bestaande bekkenen worden daarbij geen problemen met toestromend grondwater ervaren. Dit lijkt het

gevolg van een combinatie van een grondwatersituatie die gunstiger is dan gemodelleerd, en het slechts beperkt en sporadisch uitzakken van het peil in de bestaande bekkens (mond. meded. PWN).

2.2.2.1 Kalibratie

Het model berekent in de uitgangssituatie op deze locatie een stijghoogte tussen de -0.5 en -0.7 m NAP. PWN meet echter in de directe nabijheid een stijghoogte van -1.1 m NAP, en meer landinwaarts een stijghoogte van -1.5 m NAP (mond. meded. PWN). Het verschil in stijghoogte tussen meting en model kan worden veroorzaakt door een te lage aangenomen weerstand onder het IJsselmeer in het model, waardoor de stijghoogte te veel naar het IJsselmeerpeil wordt 'getrokken'. Andere mogelijke verklaringen zijn een te hoge deklaagweerstand onder de polders, of een te laag doorlaatvermogen (transmissiviteit) van het watervoerende pakket.

Door middel van een rudimentaire kalibratie is het berekende stijghoogteverloop in het watervoerende pakket in lijn gebracht met de door PWN gemeten stijghoogten. Dit is bereikt door de weerstand onder het gehele IJsselmeer sterk te verhogen, tot minimaal 10.000 dagen (Figuur 5). Verder zijn geen aanpassingen aan het model gedaan.



Figuur 5 Deklaagweerstand IJsselmeer in basismodel (links) en na aanpassing (rechts).

Overigens geeft de in het LHM 4.1 opgenomen herziening van de deklaagweerstand van het IJsselmeer (Janssen et al., 2020) rondom locatie 2 min of meer dezelfde weerstand als opgenomen in het basismodel. De opgelegde weerstand van 10.000 dagen betreft derhalve puur een modelijking / gevoeligheidsanalyse, die vooralsnog niet wordt ondersteund door geologische informatie. Nader onderzoek is nodig om de geohydrologie rond bekkenlocatie 2 beter te doorgronden.

2.2.2.2 Scenario's

Met het aangepaste model voor locatie 2 zijn de volgende scenario's doorgerekend:

- Referentiescenario, waarbij geen nieuw bekken is geïmplementeerd,
- Peilverloop als in basisscenario, met een regulier peil van -0.3 m NAP en maximale uitzakking naar -5.3 m NAP.
- Peilverloop met een regulier peil van -0.3 m NAP en maximale uitzakking naar -1.0 m NAP.
- Peilverloop met een regulier peil van +0.5 m NAP en maximale uitzakking naar -3.0 m NAP (verloop in de tijd gelijk aan basisscenario).

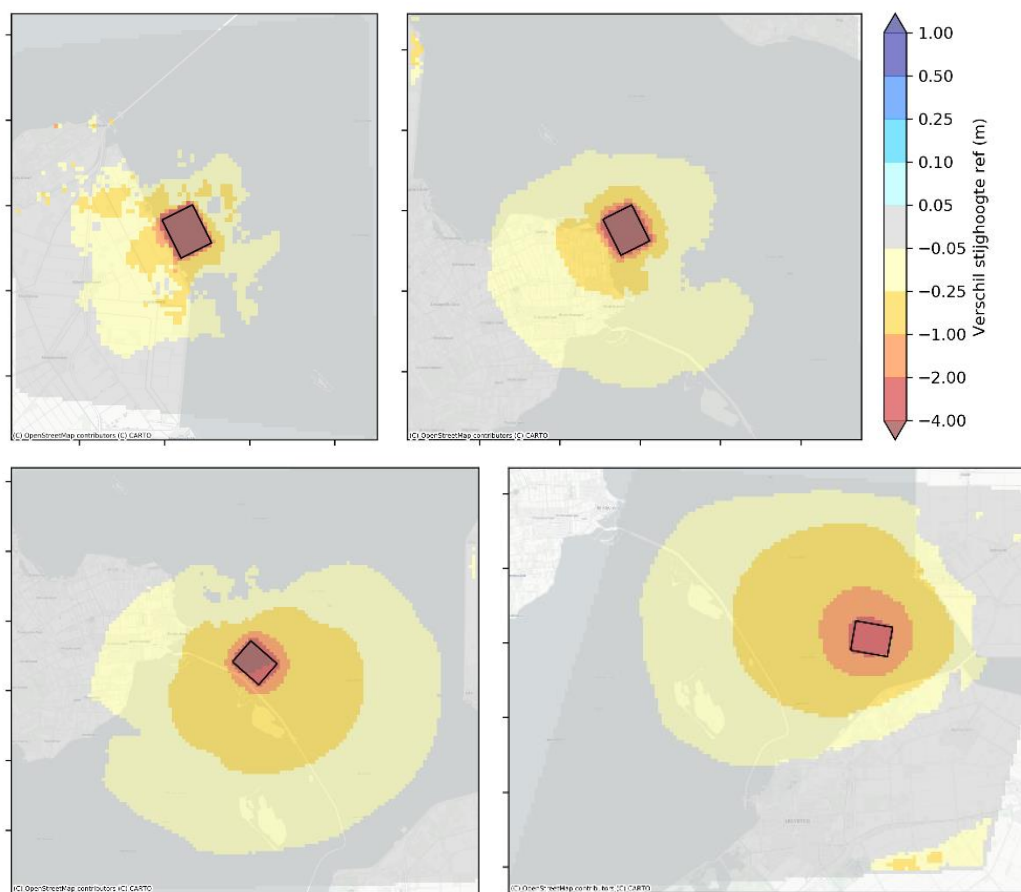
3 Resultaten

3.1 Basisscenario's

Uitgebreide resultaten van de basisscenario's zijn per scenario opgenomen als bijlage A. Resultaten van het inspelen van de chlorideverdeling onder het IJsselmeer zijn opgenomen als bijlage C.

3.1.1 Stijghoogte

Het effect van het voorraadbekken op de stijghoogte in het watervoerende pakket (Figuur 6) is vooral afhankelijk van het verschil tussen het peil in het voorraadbekken en de heersende stijghoogte en de deklaagweerstand. Voor locatie 1 geldt dat de deklaagweerstand onder het IJsselmeer vrij klein is. Het IJsselmeer heeft daarom een grote invloed op de stijghoogte, en het effect van het bekken is beperkt. Voor de overige locaties is er een redelijke (locatie 2) tot grote (locaties 3, 4) weerstand aanwezig, en is het effect van het bekken op de stijghoogte dan ook groot. Voor alle locaties geldt dat deze invloed reikt tot onder land, voor locatie 1 is er daarbij ook een effect op de freatische grondwaterstand (Figuur 16).



Figuur 6 Stijghoogteverandering in het eerste watervoerende pakket bij maximale peiluitzakking in het voorraadbekken, voor locaties 1 (linksboven), 2 (rechtsboven), 3 (linksonder) en 4 (rechtsonder).

3.1.2 Wegzgingsflux

Afhankelijk van het verschil tussen de stijghoogte in het watervoerende pakket en het waterpeil stroomt water vanuit het grondwatersysteem in of uit het voorraadbekken. De

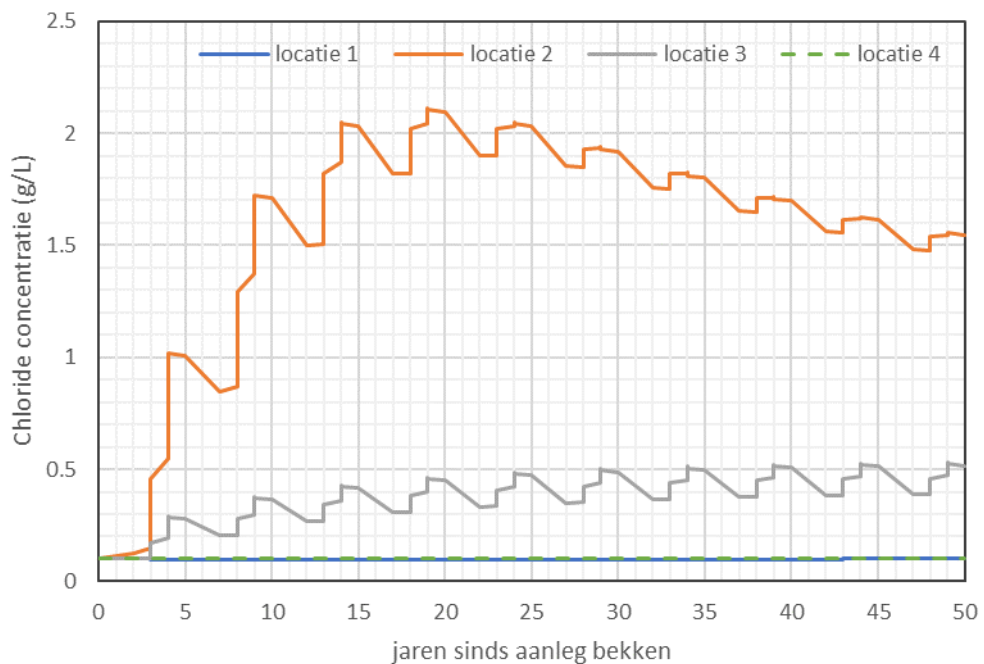
wegzijgingsflux varieert over de verschillende locaties, van beperkt (locatie 2) tot erg groot (locatie 4) (Tabel 1). Bij maximale uitzakking tot -5.3 m NAP komt het waterpeil op alle locaties onder de stijghoogte, en stroomt dus grondwater het bekken in. Deze balans van wegzijging tijdens het reguliere peil en instroom bij uitzakking zorgt voor locaties 2 en 3 voor een netto instroom van grondwater over de vijfjarige waterpeilcyclus. Voor locaties 1 en 4 verliest het voorraadbekken netto over de waterpeilcyclus water. Voor locatie 4 is deze uitstroom door de lage stijghoogte in het grondwater (nabijheid Flevopolders) erg groot.

Tabel 1 Overzicht uitwisseling voorraadbekken en het omliggende grondwater.

Bekken	Wegzijgingsflux bij regulier peil (mm/d)	Netto uitstroming over 5-jarige cyclus (Mm ³)
Locatie 1	4	2
Locatie 2	0.8	-12
Locatie 3	2.2	-2.4
Locatie 4	16	58

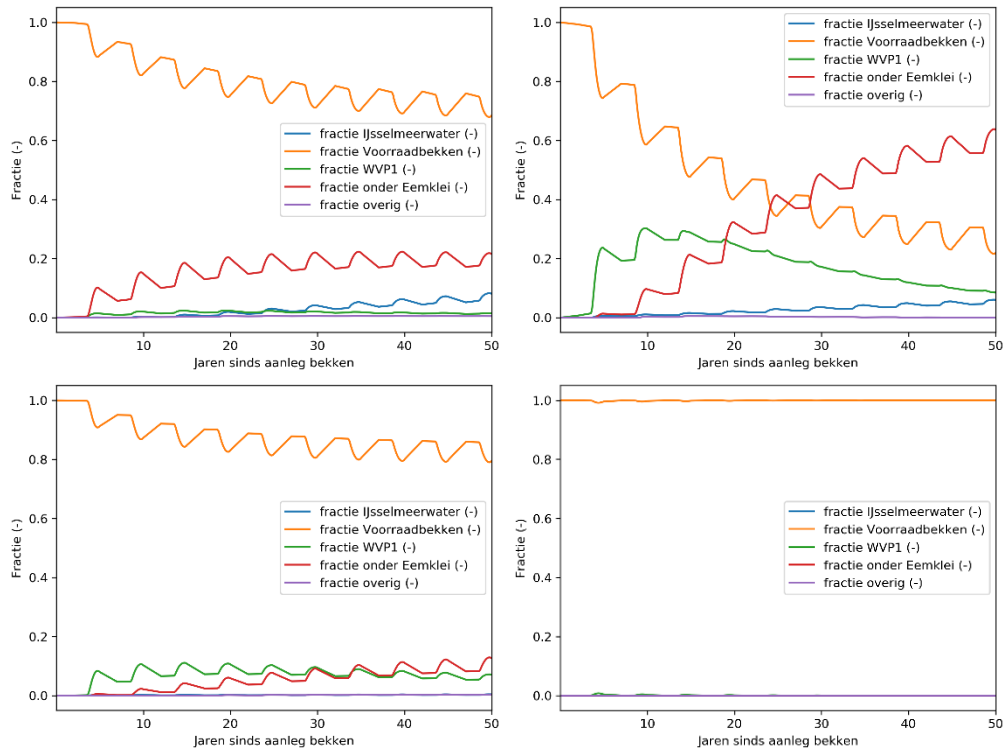
3.1.3 Samenstelling bekkenwater

Figuur 7 geeft de ontwikkeling van de gemiddelde chlorideconcentratie in het bekken voor de verschillende locaties. Voor locaties 1 en 4, met netto uitstroom uit het bekken, blijft de chlorideconcentratie min of meer gelijk over de modelperiode. Locaties 2 en 3 verzilten over de modelperiode, voor locatie 2 neemt de chlorideconcentratie toe tot zo'n 2 g/L na 15 jaar. In de concentratieverlopen is het cyclische verloop van het waterpeil zichtbaar als een pulsgewijze verandering van de gemiddelde concentratie in het bekken. Rond locatie 1 is het omringende grondwater bij aanvang zoeter dan het gemodelleerde bekkenwater, gaande de rekenperiode wordt het omringende grondwater wat zouter.



Figuur 7 Ontwikkeling van de berekende gemiddelde chlorideconcentraties in het voorraadbekken over de modelperiode voor de verschillende locaties.

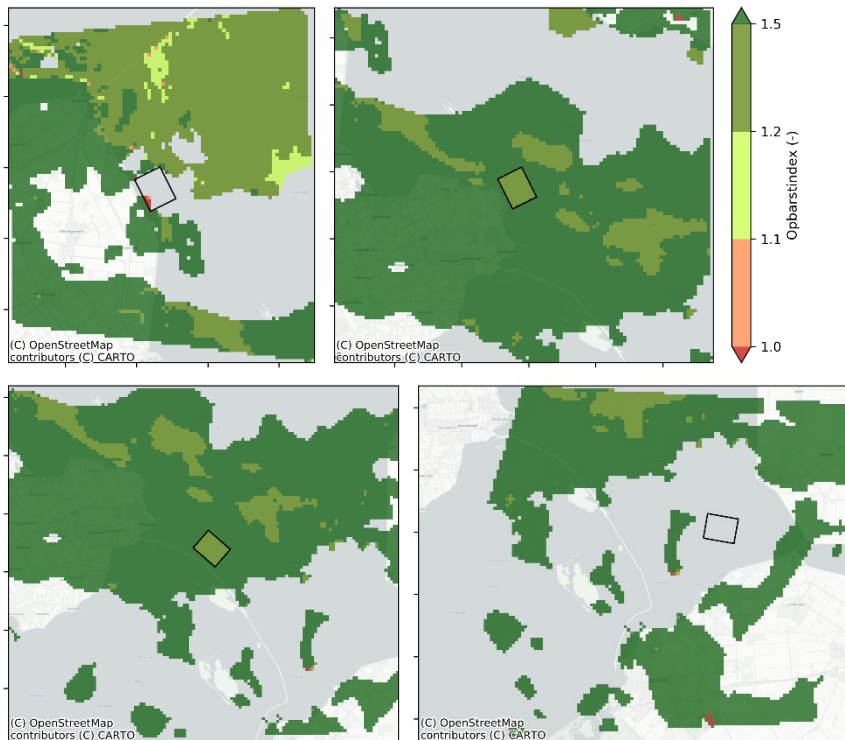
De berekende veranderende herkomst van het water in het bekken – zoals bepaald met de gemodelleerde conservatieve tracers – wordt gegeven in Figuur 8. In lijn met de eerder getoonde resultaten laat locatie 2 een snelle toestroom van water uit het omliggende grondwater zien, terwijl het water in het bekken op locatie 4 gedurende de hele rekenperiode volledig ‘bekkenwater’ blijft. Het grondwater dat bij uitzakkend waterpeil wordt aangetrokken is rond locatie 4 origineel afkomstig uit het voorraadbekken. Locaties 1 en 3 laten een gemengd beeld zien.



Figuur 8 Ontwikkeling van de berekende gemiddelde herkomst van het water in het voorraadbekken over de modelperiode, voor locaties 1 (linksboven), 2 (rechtsboven), 3 (linksonder) en 4 (rechtsonder). Overig is water niet afkomstig uit de genoemde bronnen, en is in deze analyse altijd 0.

3.1.4 Opbarstrisico Eemklei

Voor de verschillende locaties is onderzocht of er bij maximale peiluitzakking in het voorraadbekken risico bestaat op het opbarsten van de onderliggende Eemklei laag (Figuur 9). Voor locatie 4 is dit niet aan de orde, omdat er op deze locatie geen Eemklei aanwezig is. Voor locaties 2 en 3 geldt dat er na aanleg van het voorraadbekken nog altijd een deel van het watervoerend pakket aanwezig is onder het voorraadbekken. De hydraulische gradiënt over de Eemklei is op deze locaties daarom beperkt, het bovenliggend gewicht is relatief groot door het nog aanwezige zandpakket, en het risico op opbarsten is dan ook klein. Voor locatie 1 valt de modelimplementatie van het bekken grotendeels in zone waar geen Eemklei aanwezig is. Waar de Eemklei onder het bekken wel aanwezig is, is deze dermate ondiep aanwezig dat deze wordt aangesneden (maar niet volledig doorsneden) door het bekken. Alleen op deze rand van de Eemklei op locatie 1 wordt het risico op opbarsten van de Eemklei als hoog berekend.



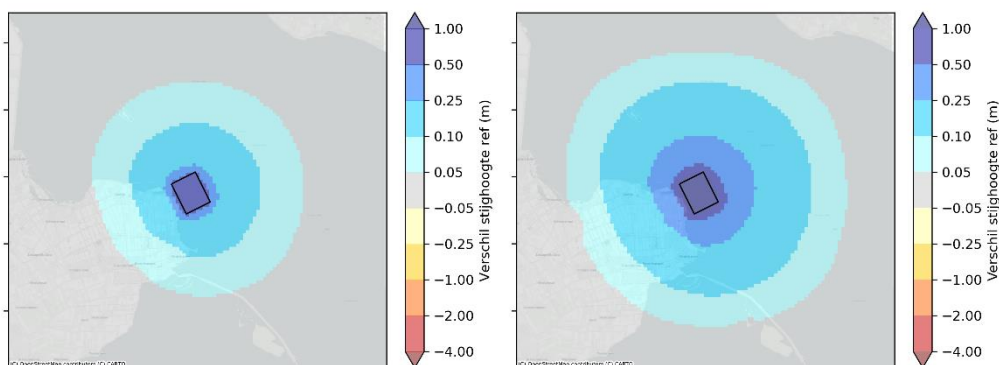
Figuur 9 Berekende opbarstindex van Eemklei (Eek1) bij maximale peiluitzakking voor locaties 1 (linksboven), 2 (rechtsboven), 3 (linksonder) en 4 (rechtsonder). Bij een opbarstindex < 1.1 is er risico op opbarsting te verwachten. Waar geen Eemklei aanwezig is, is de onderliggende topografische kaart zichtbaar.

3.2 Vervolgscenario's voor locatie 2

Uitgebreide resultaten van de vervolgscenario's zijn per scenario opgenomen als bijlage B. Door de sterke aanpassing van de deklaagweerstand in het IJsselmeer is de stijghoogte ter plaatse van locatie 2 verlaagd tot -1.1 m NAP, in lijn met door PWN gemeten stijghoogten op deze locatie (Figuur 50, bijlage B).

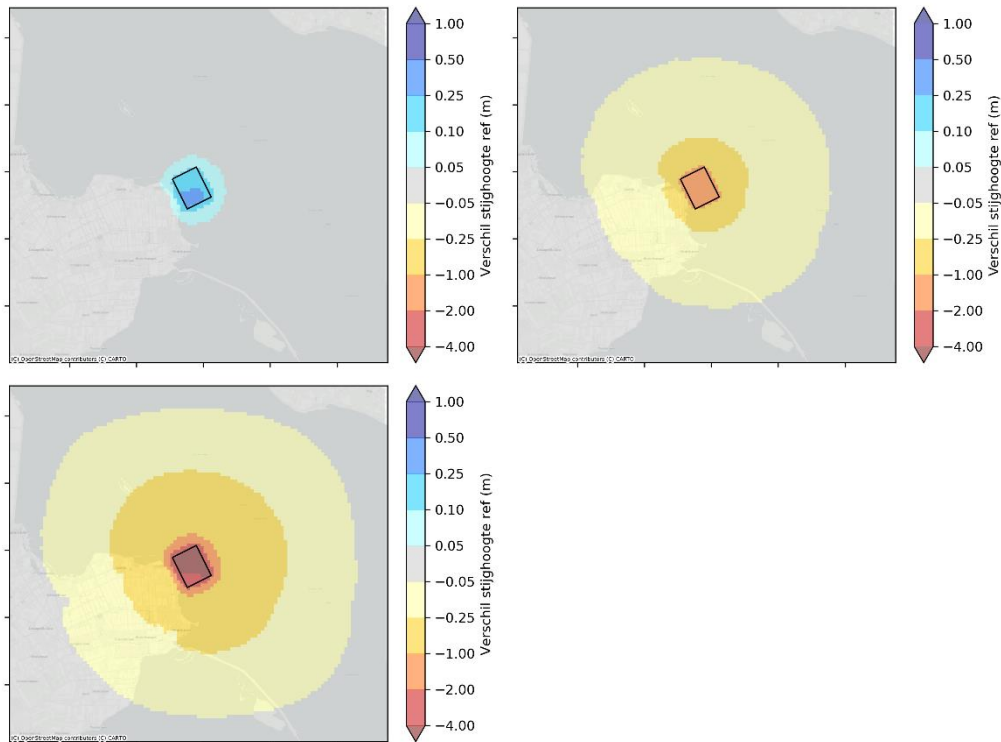
3.2.1 Stijghoogte

De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket neemt na aanleg van het bekken duidelijk toe, door doorsnijding van de deklaagweerstand onder het IJsselmeer. De toename is bij een hoger regulier waterpeil navenant hoger (Figuur 10). De uitstraling is door de hoge weerstand duidelijk groter dan voor deze locatie in het basisscenario.



Figuur 10 Stijghoogteverandering ten opzichte van de situatie zonder bekken in het eerste watervoerende pakket bij gehanteerd regulier waterpeil van -0.3 m NAP (links) en +0.5 m NAP (rechts).

Het effect bij maximale peiluitzakking op de stijghoogte in het watervoerende pakket hangt uiteraard samen met de gehanteerde maximale peiluitzakking (Figuur 11). Bij een maximale uitzakking tot -1 m NAP is zelfs nog sprake van een verhoging van de stijghoogte, de stijghoogte in de referentie ligt op -1.1 m NAP.



Figuur 11 Stijghoogteverandering ten opzichte van de situatie zonder bekken in het eerste watervoerende pakket bij maximale peiluitzakking in het voorraadbekken, voor een uitzakking van -1 m NAP (linksboven), -3 m NAP (rechtsboven) en -5.3 m NAP (linksonder).

3.2.2 Wegzijgingsflux

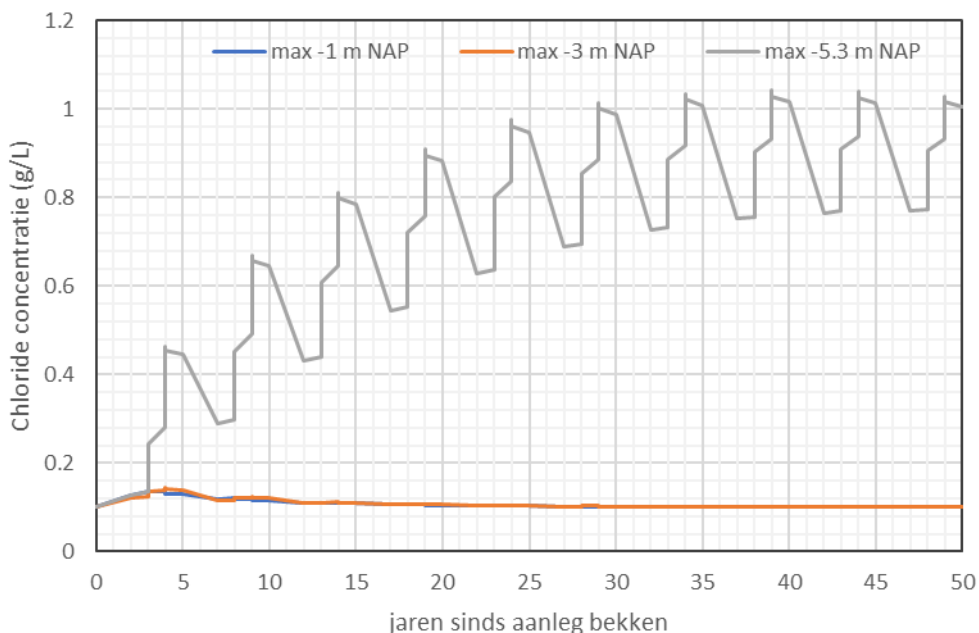
Afhankelijk van het verschil tussen de stijghoogte in het watervoerende pakket en het waterpeil stroomt er water vanuit het grondwater in of uit het bekken. De wegzijgingsflux varieert over de scenario's, al naar gelang het gehanteerde waterpeilverloop in het bekken (Tabel 2). Bij een regulier waterpeil van -0.3 m NAP en maximale uitzakking tot -1 m NAP is continu sprake van wegzijging. Bij een regulier waterpeil van +0.5 m NAP en maximale uitzakking tot -3 m NAP wordt de instroom bij uitzakking gecompenseerd door de reguliere wegzijging, en stroomt er netto water uit het bekken. Bij een regulier waterpeil van -0.3 m NAP en maximale uitzakking tot -5.3 m NAP is netto sprake van instroom van grondwater in het bekken.

Tabel 2 Overzicht uitwisseling voorraadbekken en het omliggende grondwater voor verschillende waterpeil scenario's voor locatie 2.

Scenario	Wegzijgingsflux bij regulier peil (mm/d)	Netto uitstroming over 5-jarige cyclus (Mm ³)
Regulier -0.3, maximaal -5.3 m NAP	2.2	-1.7
Regulier -0.3, maximaal -1 m NAP	2.2	11
Regulier +0.5, maximaal -3 m NAP	4	14

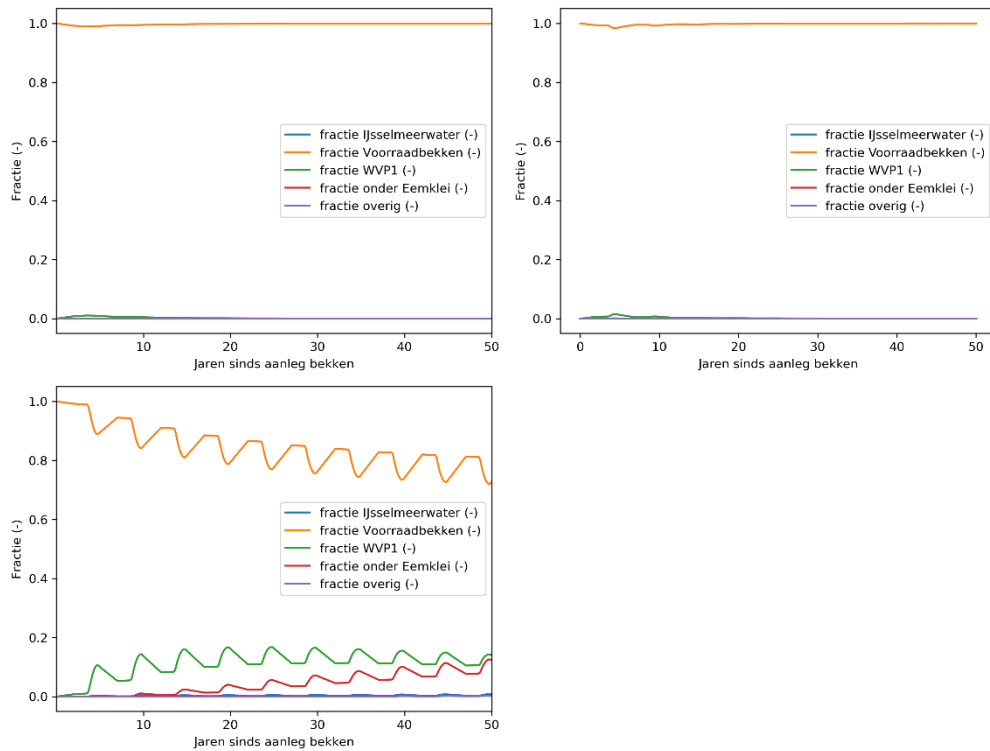
3.2.3 Samenstelling bekkenwater

Figuur 12 geeft de ontwikkeling van de gemiddelde chlorideconcentratie in het bekken voor verschillende waterpeil scenario's. Voor de scenario's met netto uitstroom (regulier -0.3 m, max -1 m NAP, en regulier +0.5 m, max -3 m NAP) blijft de chlorideconcentratie min of meer 0.1 g/L. Beide scenario's kennen een tijdelijke (~ 15 jaar) lichte verzilting door toestromend grondwater. Bij het scenario met regulier -0.3 m NAP en maximale uitzakking tot -5.3 m NAP verzilt het water in het bekken tot uiteindelijk 0.8 – 1.0 g/L chloride.



Figuur 12 Ontwikkeling van de berekende gemiddelde chlorideconcentraties in het voorraadbekken over de modelperiode, voor scenario's regulier -0.3 m, max -1 m NAP, regulier +0.5 m, max -3 m NAP en regulier -0.3 m, max -5.3 m NAP,

De berekende veranderende herkomst van het water in het bekken wordt gegeven in Figuur 13. In de scenario's met netto uitstroom blijft het water in het voorraadbekken nagenoeg volledig bestaan uit 'bekkenwater'. Voor het scenario regulier +0.5m, max -3 m uitzakking geldt dat het watervoerend pakket hierbij als buffer voor het bekkenwater dient: tijdens regulier peil stroomt water het bekken uit, dat deels bij uitzakking van het peil weer terug het bekken in stroomt. In scenario regulier -0.3, max uitzakking -5.3 m NAP neemt het aandeel 'bekkenwater' over de modelperiode af tot zo'n 80%, het water in het voorraadbekken bestaat na 50 jaar voor zo'n 20% uit origineel grondwater (fractie WVP1 + fractie onder Eemklei). Deze afname kent een pulsgewijs verloop door het cyclisch opgelegde waterpeilverloop.



Figuur 13 Ontwikkeling van de berekende gemiddelde herkomst van het water in het voorraadbekken over de modelperiode, voor scenario's regulier -0.3, max -1 m NAP (linksboven), regulier +0.5, max -3 m NAP (rechtsboven) en regulier -0.3, max -5.3 m NAP (linksonder).

3.2.4 Opbarstrisico Eemklei

Het opbarstrisico van de Eemklei voor locatie 2 is voor alle vervolgsenario's minimaal, net als onder het basisscenario.

4 Discussie en conclusies

Met behulp van uitsneden uit het landsdekkende LHM zoet-zout model, versie 4.0 (Delsman et al., 2020), zijn verkennende berekeningen gedaan naar de geohydrologische effecten van de aanleg van een voorraadbekken op vier mogelijke locaties in het IJsselmeer (Figuur 1). Omdat uit eerdere analyse van het LHM zoet-zout 4.0 is gebleken dat specifiek de chloridemetingen onder het IJsselmeer de situatie rond 1970 weergeven (Delsman, 2020), is de zoet-zoutverdeling in het model 50 jaar ingespeeld. De onderzochte voorraadbekkens zijn elk 15 m diep, doorsnijden de deklaag onder het IJsselmeer, en kennen een cyclisch waterpeilverloop, variërend tussen -0.3 en -5.3 m NAP dat het beoogde gebruik van het bekken simuleert. In een drietal vervolgsenario's is de geohydrologie rond locatie 2 meer in lijn gebracht met meetresultaten van PWN. Vervolgens is voor deze locatie gekeken naar verschillende mogelijke waterpeilfluctuaties.

De berekeningsresultaten van de basisscenario's laten duidelijke verschillen zien tussen de vier mogelijke locaties. Deze verschillen hangen met name samen met de regionale stijghoogtegradiënt in het watervoerende pakket en de weerstand van de deklaag onder het IJsselmeer ter plaatse van de bekkenlocatie. De interactie van het voorraadbekken met het grondwater op de locaties is afhankelijk van het opgelegde waterpeilverloop. Bij regulier peil zijgt er uit alle bekkens water weg, bij maximale uitzakking trekken alle bekkens grondwater aan. De verhouding tussen beide bepaalt op lange termijn of de bekkens verzilting laten zien.

Locatie 1 wordt gekenmerkt door een lage weerstand onder het IJsselmeer, en een regionale grondwaterstroming richting de Wieringermeerpolder. Ondanks de nabijheid van ondiep zout grondwater ligt de gekozen locatie in een zoete grondwaterstroming richting de Wieringermeerpolder en blijft daardoor zoet. Het bekken verliest netto water aan het grondwater. De gekozen locatie snijdt randen aan van de Eemklei, er is een duidelijk risico op opbarsten van deze laag.

Locatie 2 ligt nabij de huidige spaarbekkens van PWN bij Andijk. In het basisscenario voor deze locatie is de stijghoogtegradiënt beperkt, waardoor het bekken in de berekeningen netto grondwater aantrekt. Het grondwater in de omgeving is brak, het bekken verzilt dan ook snel. De bestaande bekkens van PWN verzilten echter niet, daarnaast laten stijghoogtemetingen een sterkere stijghoogtegradiënt zien dan uit de berekeningsresultaten blijkt. In vervolgsenario's is verder naar deze locatie gekeken.

Locatie 3 ligt aan de Markerwaarddijk. De stijghoogtegradiënt op deze locatie is sterker dan voor locatie 2. Netto trekt dit bekken in de berekeningen nog grondwater aan en verzilt over de modelperiode. Locatie 4 ligt dicht bij de Noordoost- en Flevopolder en kent de sterkste stijghoogtegradiënt. Bij normale vullingsgraad en netto over een waterpeilcyclus zijgt er dan ook een flinke hoeveelheid water weg uit dit bekken. Het bekken blijft volledig bestaan uit ingenomen drinkwater.

Mogelijke opbarsting van de Eemklei lijkt voor locaties 2, 3 en 4 geen issue. Bij locaties 2 en 3 is er nog een flinke zandlaag aanwezig tussen de bodem van het bekken en de Eemklei, waardoor de opwaartse druk over de Eemklei beperkt blijft. Bij locatie 4 is geen Eemklei aanwezig.

In vervolgsenario's is verder gekeken naar locatie 2. Hierbij is de deklaagweerstand onder het IJsselmeer in de berekeningen verhoogd tot 10.000 dagen, waardoor de berekende stijghoogte in het eerste watervoerende pakket meer in lijn is met de door PWN gemeten

stijghoogte. Daarbij moet worden aangetekend dat de herziene deklaagweerstand van het IJsselmeer (zoals opgenomen in LHM4.1 (Janssen et al., 2020)) voor deze locatie niet veel afwijkt van de in de basisscenario's gehanteerde weerstand, en ook geen hoge weerstand laat zien. Een uitgebreidere kalibratie, waarin ook wordt gekeken naar in ieder geval de deklaagweerstand onder de West-Friese polders en de transmissiviteit van het watervoerende pakket is dan ook aan te raden. Zonder een dergelijke kalibratie moeten de resultaten met omzichtigheid worden geïnterpreteerd.

Met de aangepaste geohydrologie, gecombineerd met aanpassingen aan het gehanteerde waterpeilverloop, is verzilting van een voorraadbekken op locatie 2 in de berekeningen te voorkomen. Waar het oorspronkelijke waterpeilverloop (regulier -0.3 m NAP, elke vijf jaar uitzakking tot -5.3 m NAP) nog tot verzilting van het bekken leidt, lijkt dit te voorkomen door ofwel het peil minder uit te laten zakken, ofwel het waterpeil regulier hoger op te zetten. In het laatste geval wordt het grondwater als buffer gebruikt, waarbij eerder geïnfiltrerd 'bekkenwater' bij peiluitzakking weer terugstroomt in het voorraadbekken. Het hoger opzetten van het reguliere peil gaat wel gepaard met een significant verlies aan water door wegzijging naar het watervoerende pakket.

Deze studie heeft een sterk verkennend karakter. Er is hierbij gebruik gemaakt van uitsneden uit het LHM zoet-zoutmodel versie 4.0. Juist voor het IJsselmeergebied zijn de resultaten van dit model eind 2020 nader beschouwd en is herziening van de schematisatie aanbevolen (Delsman, 2020). Voor de basisscenario's heeft geen kalibratie of validatie van het model plaatsgevonden, voor de vervolgsenario's rond locatie 2 is er slechts één grove aanpassing gedaan. Daarbij komt dat de gerapporteerde resultaten sterk afhankelijk zijn van de berekende stijghoogtegradiënt, en het gehanteerde waterpeilverloop. De gerapporteerde berekeningsresultaten moeten dan ook in dit licht worden beschouwd.

Voor nadere analyse van de geohydrologische effecten van een voorraadbekken in het IJsselmeer dienen de modellen te worden getoetst aan meetgegevens, zowel metingen van de stijghoogte maar zeker ook van de zoet-zoutverdeling rondom mogelijke bekkenlocaties. Airborne EM metingen kunnen ook onder oppervlaktewater informatie verschaffen over de zoet-zoutverdeling in het grondwatersysteem (Delsman et al., 2018). Verhoging van de modelresolutie in tijd en ruimte is bij nadere modellering aan te raden, voor een preciezere berekening van grondwatersnelheden van en naar het bekken. Voor een robuuste analyse is het aan te bevelen hierbij een onzekerheidsanalyse uit te voeren, waarbij geohydrologische parameters, in ieder geval de deklaagweerstand onder het IJsselmeer, worden gevarieerd. De onzekerheidskwantificering in het LHM zoet-zout chloridebestand kan hierbij als basis dienen voor het meenemen van de onzekerheid in de zoet-zoutverdeling. Ondanks het verkennende karakter maakt deze studie inzichtelijk welke factoren het geohydrologische effect van een voorraadbekken in het IJsselmeer bepalen. Op basis van deze factoren zou – voorafgaand aan nader detailonderzoek – verder kunnen worden geoptimaliseerd in zowel de ligging in het IJsselmeer, als het te hanteren waterpeilverloop.

5 Referenties

Delsman, J., 2020. Nadere plausibiliteitsanalyse LHM zoet-zout ten behoeve van toepassing binnen KP Zeespiegelstijging, Deltares memo 11205261-003-BGS-0002.

Delsman, J., Oude Essink, G., Huizer, S., Bootsma, H., Mulder, T., Zitman, P., Romero Verastegui, B., Janssen, G.M.C.M., 2020. Actualisatie zout in het NHI - Toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model, Deltares rapport 11205261-003-BGS-0001. Utrecht.

Delsman, J.R., Van Baaren, E.S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karaoulis, M.C., Pauw, P., Vermaas, T., Bootsma, H., de Louw, P.G.B., Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Steuer, A., Meyer, U., Revil, A., Oude Essink, G.H.P., 2018. Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. *Environ. Res. Lett.* 13, 084011.

Janssen, G., Walsum, P. van, America, I., Pouwels, J., Hunink, J., Vermeulen, P., Meshgi, A., Prinsen, G., Mulder, N., Visser, M., Kroon, T., 2020. Veranderingsrapportage LHM 4.1 - Beheer en onderhoud van de landelijke toepassing van het NHI, Deltares rapport 11205261-000-BGS-0001. Utrecht.

A Resultaten basisscenario's

A.1 Basisscenario - locatie 1

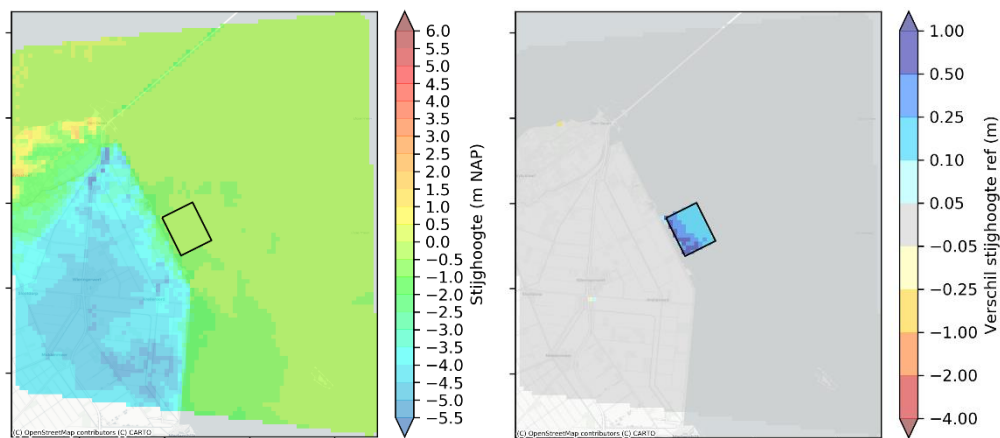
Locatie 1 bevindt zich dicht tegen de Wieringermeerpolder, ten noordoosten van Wieringerwerf (Figuur 14). De afstand tussen het voorraadbekken en de IJsselmeerdijk is enkele honderden meters.



Figuur 14 Ligging voorraadbekken locatie 1 (doorgetrokken zwarte lijn) en ligging getoonde doorsneden (gestippelde lijnen).

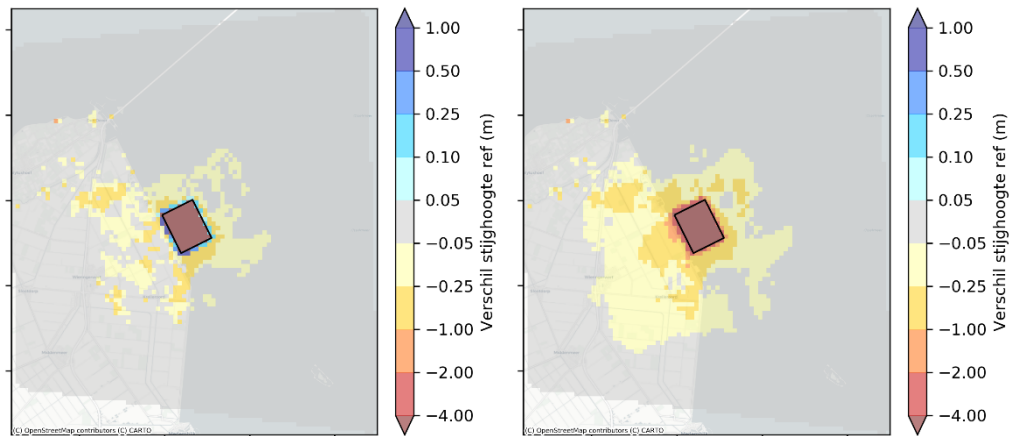
A.1.1 Stijghoogte

Op deze locatie is weinig weerstand aanwezig tussen het IJsselmeer en het watervoerende pakket. Door het doorsnijden van de weerstand die wel aanwezig is, neemt de stijghoogte ter plaatse van het voorraadbekken bij volledige vullingsgraad enkele tientallen centimeters toe (Figuur 15). Bij volledige vullingsgraad is het peil in het voorraadbekken gelijk aan het gemiddelde IJsselmeerpeil (-0.3 m NAP). De verhoging straalt door de lage weerstand onder het IJsselmeer niet uit in het omliggende pakket.



Figuur 15 Stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m NAP, links), en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket met situatie zonder voorraadbekken (m, rechts) bij waterpeil op gemiddeld IJsselmeerniveau (-0.3 m NAP).

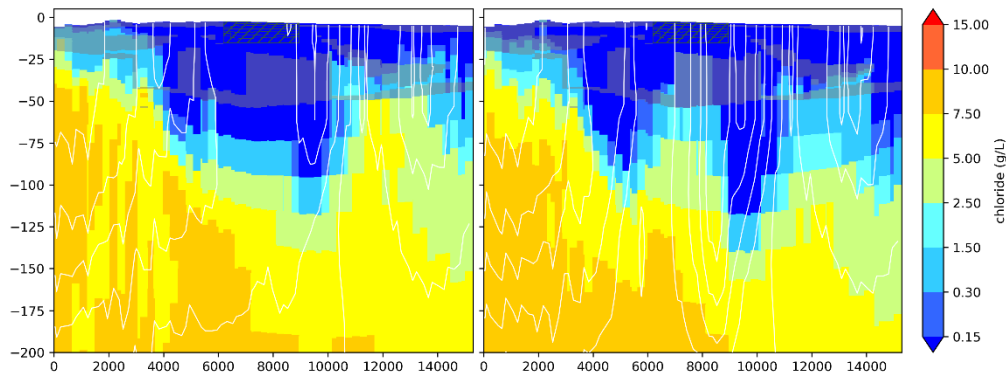
Bij minimale vullingsgraad van het bekken (-5.3 m NAP) wordt de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket tot zo'n 5 km landinwaarts merkbaar verlaagd. Deze effecten werken door naar het freatische grondwater (Figuur 16).



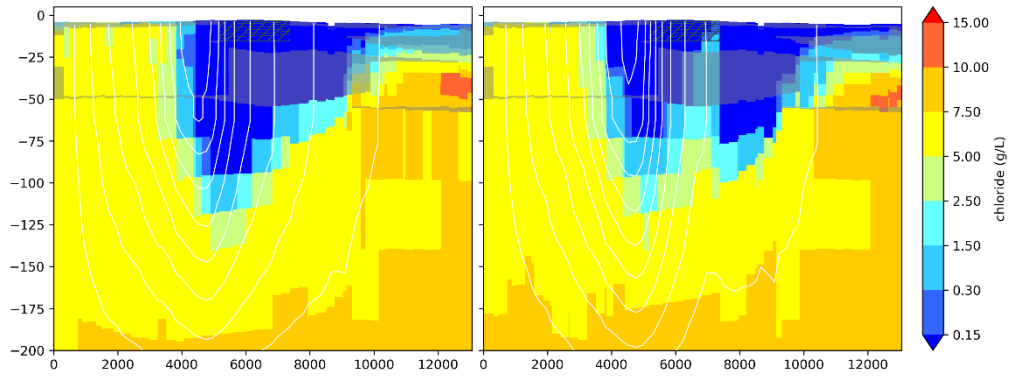
Figuur 16 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij volledig uitgezakt waterpeil in het bekken (-5.3 m NAP).

A.1.2 Verandering zoet-zoutverdeling

Het variërende waterpeil in het voorraadbekken zorgt voor een langzame verplaatsing van zoet en zout grondwater rondom en onder het bekken. Hoewel netto water vanuit het voorraadbekken in het grondwater infiltreert, wordt in het midden van het bekken dieper, brakker grondwater aangetrokken (Figuur 17). Aan de zijde van de Wieringermeerpolder stroomt water uit het bekken naar de polder toe, aan de IJsselmeerzijde stroomt grondwater netto juist in de richting van het voorraadbekken (Figuur 18).



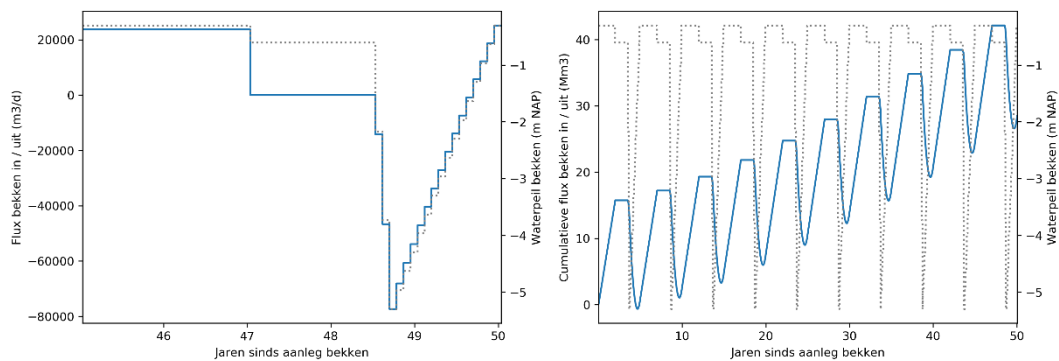
Figuur 17 Chlorideverdeling in het grondwater voor een noord-zuid doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.



Figuur 18 Chlorideverdeling in het grondwater voor een west-oost doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.

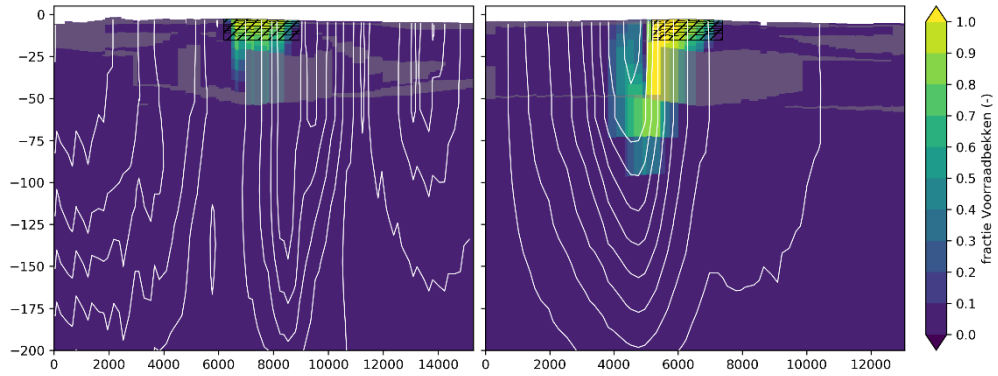
A.1.3 Uitwisseling voorraadbekken en grondwater

Figuur 19 geeft de uitwisseling tussen voorraadbekken en het grondwater weer in de tijd. De uitwisseling tussen bekken en grondwater is sterk afhankelijk van het waterpeil in het bekken. Bij maximale vullingsgraad zijgt water uit het bekken weg naar het grondwater, met zo'n 4 mm/d. Vervolgens is er geen uitwisseling, het waterpeil in het bekken stelt zich in op de stijghoogte in het omliggende grondwater. Wanneer het water in het bekken wordt gebruikt en het peil daalt, wordt grondwater aangetrokken naar het bekken. Netto is er over een vijfjarige cyclus sprake van een verlies van zo'n 2 Mm³ uit het voorraadbekken.



Figuur 19 Uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende één waterpeilcyclus (m³/d, links), en de cumulatieve uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende de 50-jarige rekenperiode (Mm³/d, rechts). Positieve waarden betekenen een uitstroom van water uit het bekken naar het grondwater. In de figuren is met een stippellijn ook het waterpeilverloop in het voorraadbekken aangegeven.

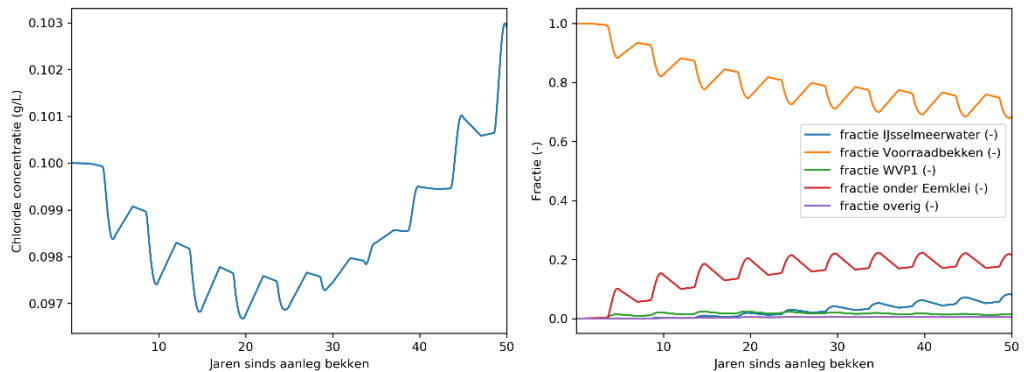
Deze netto uitstroom van water uit het voorraadbekken is ook zichtbaar in Figuur 20. Na 50 jaar is er een duidelijke uitstroom van water uit het voorraadbekken in de richting van de Wieringermeerpolder zichtbaar (Figuur 20, rechts).



Figuur 20 Verspreiding water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater (als fractie van grondwater dat afkomstig is uit het voorraadbekken) aan het einde van de 50-jarige rekenperiode. Links voor een doorsnede in noord-zuidelijke richting over het voorraadbekken, rechts voor een doorsnede in west-oostelijke richting.

A.1.4 Samenstelling water in het voorraadbekken

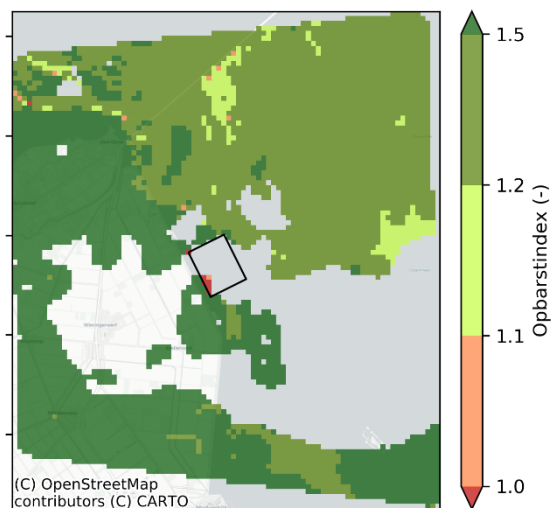
Door de uitwisseling van water in het voorraadbekken met het grondwater verandert de samenstelling van het water in het bekken (Figuur 21). Voor locatie 1 is het aandeel origineel grondwater (fracties 'WVP1' en 'onder Eemklei') in het bekken toegenomen tot zo'n 20%. Het aandeel aan direct uit het IJsselmeer afkomstig water neemt in 50 jaar toe tot 8%. De gemiddelde chlorideconcentratie in het voorraadbekken verandert weinig, deze neemt pas na zo'n 30 jaar toe doordat dieper, brakker grondwater wordt aangetrokken tot in het bekken.



Figuur 21 Verloop van de gemiddelde chlorideconcentratie (g/L, links) en gemiddelde herkomst van het water (fractie, rechts) in het water in het voorraadbekken gedurende de 50-jarige rekenperiode.

A.1.5 Opbarstrisico Eemklei

Op locatie 1 is de Eemklei (REGIS: Eek1) relatief ondiep, maar afwisselend wel / niet aanwezig. Op de gekozen locatie wordt de Eemklei net aangesneden door het voorraadbekken. Figuur 22 geeft de berekende opbarstingsindex voor deze locatie, voor het moment dat het peil in het bekken minimaal is. Op dat moment is sprake van de grootste oprijvende kracht en daarmee grootste kans op opbarsting. Waar de Eemklei wordt aangesneden is er sprake van een substantieel risico op opbarsting (index < 1). Doordat het hier alleen de rand van deze kleilaag betreft zal de geohydrologische impact voor de berekende situatie klein zijn. De berekende locatie valt overigens heel precies in een 'gat' in de Eemklei. Bij locaties meer noordelijk of zuidelijk van de berekende locatie kan de Eemklei een grotere rol spelen dan hier beschreven.



Figuur 22 Berekende opbarstindex van de Eemklei (Eek1) bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken (-5.3 m NAP).

A.2 Basisscenario - locatie 2

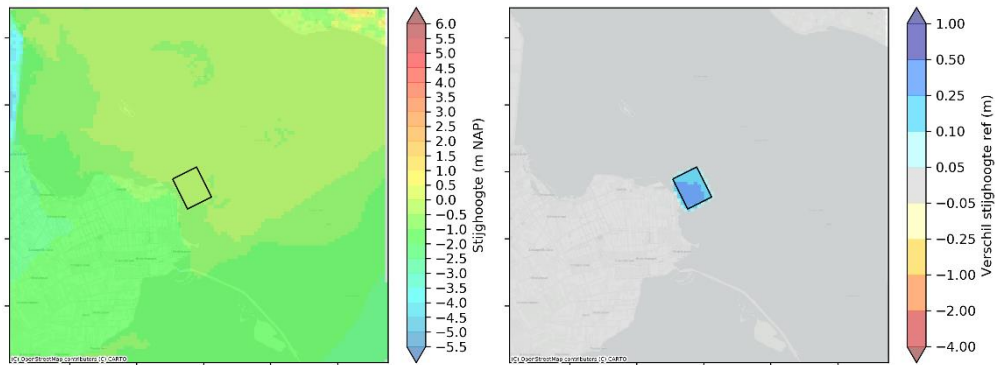
Locatie 2 bevindt zich dicht bij de bestaande inlaatlocatie van PWN bij Andijk (Figuur 23). De afstand tussen het voorraadbekken en de IJsselmeerdijk is enkele honderden meters.



Figuur 23 Ligging voorraadbekken locatie 2 (doorgetrokken zwarte lijn) en ligging getoonde doorsneden (gestippelde lijnen).

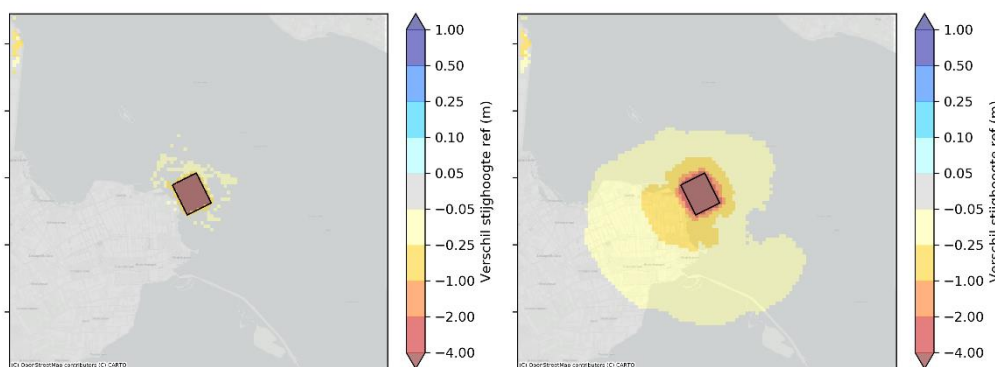
A.2.1 Stijghoogte

Op deze locatie is er enige weerstand aanwezig tussen het IJsselmeer en het watervoerende pakket (1000 d). Door het doorsnijden van de weerstand die wel aanwezig is, neemt de stijghoogte ter plaatse van het voorraadbekken bij volledige vullingsgraad enkele tientallen centimeters toe (Figuur 24). Bij volledige vullingsgraad is het peil in het voorraadbekken gelijk aan het gemiddelde IJsselmeerpeil (-0.3 m NAP). De verhoging straalt te verwaarlozen uit in het omliggende pakket.



Figuur 24 Stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m NAP, links), en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket met situatie zonder voorraadbekken (m, rechts) bij waterpeil op gemiddeld IJsselmeerniveau (-0.3 m NAP).

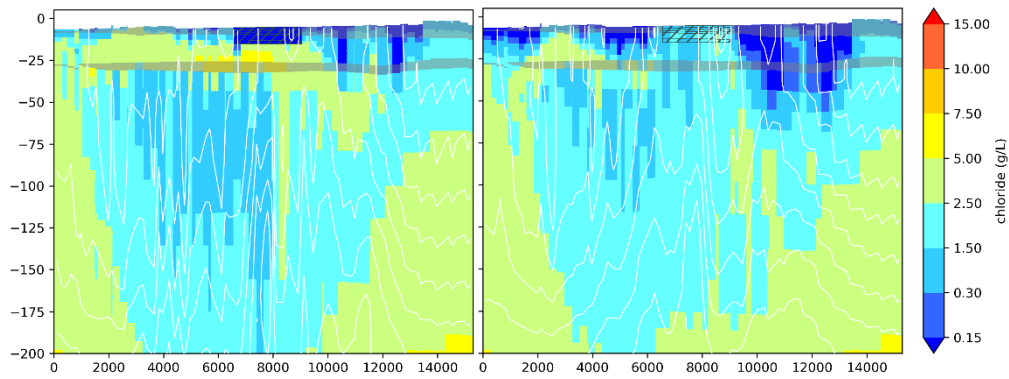
Bij minimale vullingsgraad van het bekken (-5.3 m NAP) wordt de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket tot zo'n 8 km landinwaarts merkbaar verlaagd. Deze effecten zijn niet merkbaar in het freatische grondwater in West-Friesland (Figuur 25).



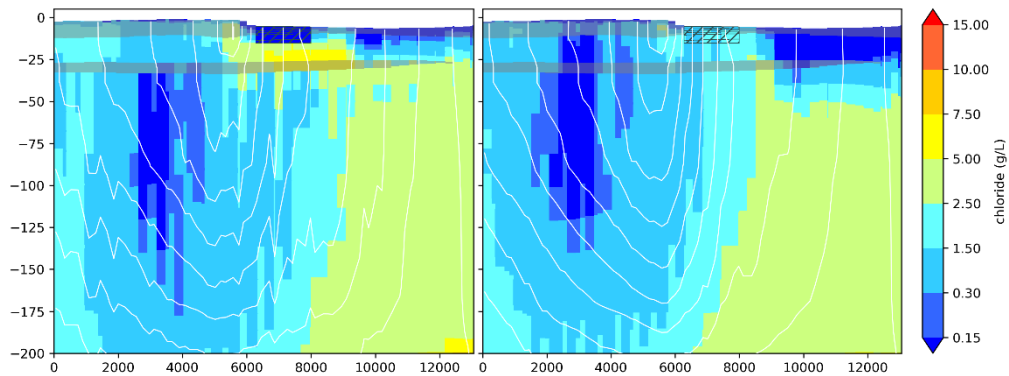
Figuur 25 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij volledig uitgezakt waterpeil in het bekken (-5.3 m NAP).

A.2.2 Verandering zoet-zoutverdeling

Voor locatie 2 is sprake van een netto toestroom van grondwater naar het voorraadbekken. Bij normale vullingsgraad (-0.3 m NAP) stroomt er van alle locaties het minste water vanuit het bekken in het grondwater. De perioden waarbij het waterpeil in het bekken daalt tot onder de stijghoogte in de omgeving en er water vanuit het grondwater systeem naar het bekken stroomt zijn dan ook dominant. Netto verplaatst grondwater uit de omgeving zich richting het voorraadbekken (Figuur 26, Figuur 27).



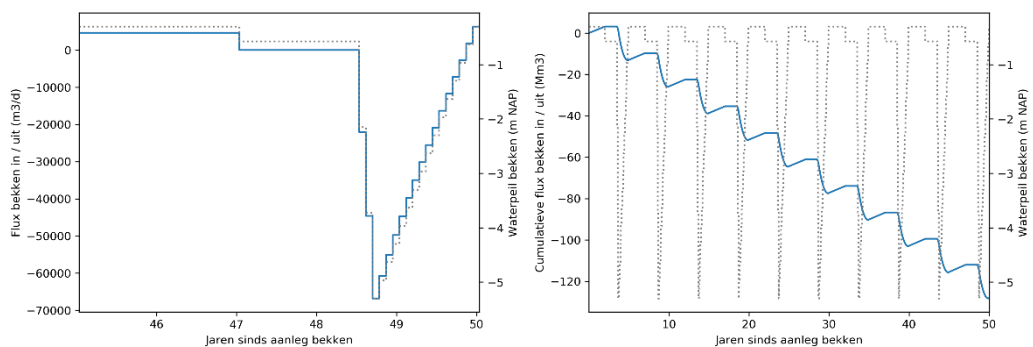
Figuur 26 Chlorideverdeling in het grondwater voor een noord-zuid doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.



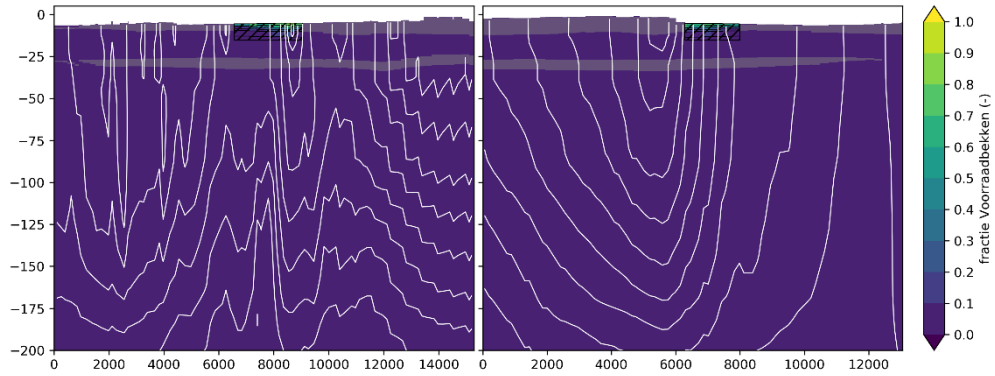
Figuur 27 Chlorideverdeling in het grondwater voor een west-oost doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.

A.2.3 Uitwisseling voorraadbekken en grondwater

De netto stroming richting het voorraadbekken is ook zichtbaar in Figuur 28 en Figuur 29. Waar bij normale vullingsgraad zo'n 0.8 mm/d wegzijgt naar het grondwater, stroomt over een vijfjarige cyclus zo'n 12 Mm³ aan grondwater het bekken in. Het water in het voorraadbekken bestaat na 50 jaar dan ook voor een groot deel uit grondwater (Figuur 29).



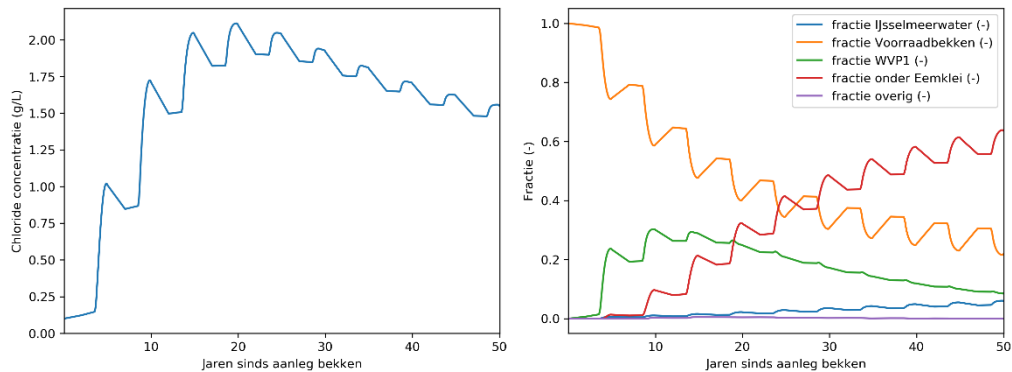
Figuur 28 Uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende één waterpeilcyclus (m³/d, links), en de cumulatieve uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende de 50-jarige rekenperiode (Mm³/d, rechts). Positieve waarden betekenen een uitstroom van water uit het bekken naar het grondwater. In de figuren is met een stippellijn ook het waterpeilverloop in het voorraadbekken aangegeven.



Figuur 29 Verspreiding water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater (als fractie van grondwater dat afkomstig is uit het voorraadbekken) aan het einde van de 50-jarige rekenperiode. Links voor een doorsnede in noord-zuidelijke richting over het voorraadbekken, rechts voor een doorsnede in west-oostelijke richting.

A.2.4 Samenstelling water in het voorraadbekken

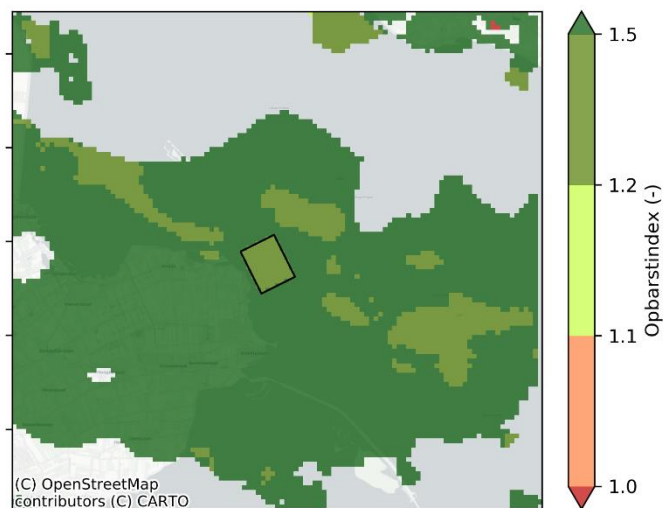
Door de toestroom van dieper brak grondwater naar het voorraadbekken neemt de gemiddelde chlorideconcentratie in het voorraadbekken relatief snel toe tot 2 g/L. Na 50 jaar is de fractie dieper grondwater toegenomen tot meer dan 60%, en is het aandeel ingenomen oppervlaktewater ('fractie Voorraadbekken') nog maar 20% (Figuur 30).



Figuur 30 Verloop van de gemiddelde chlorideconcentratie (g/L, links) en gemiddelde herkomst van het water (fractie, rechts) in het water in het voorraadbekken gedurende de 50-jarige rekenperiode.

A.2.5 Opbarstrisico Eemklei

Op locatie 2 is tussen het voorraadbekken (-15 m NAP) en de Eemklei nog enkele meters zand (watervoerend pakket) aanwezig. Hierdoor is de opdrijvende kracht onder de Eemklei niet groot genoeg om voor een groot opbarstingsrisico te zorgen (Figuur 31).



Figuur 31 Berekende opbarstindex van de Eemklei (Eek1) bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken (-5.3 m NAP).

A.3 Basisscenario - locatie 3

Locatie 3 bevindt zich ten zuidwesten van Enkhuizen, nabij de Markerwaarddijk (Figuur 32).

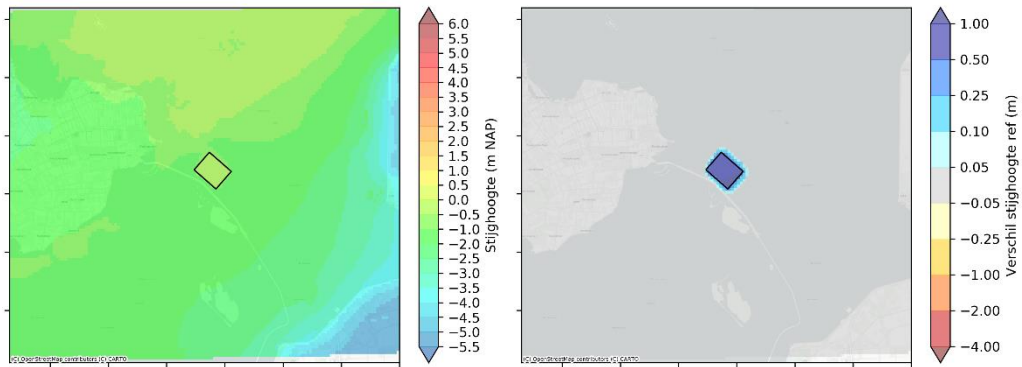


Figuur 32 Ligging voorraadbekken locatie 3 (doorgetrokken zwarte lijn) en ligging getoonde doorsneden (gestippelde lijnen).

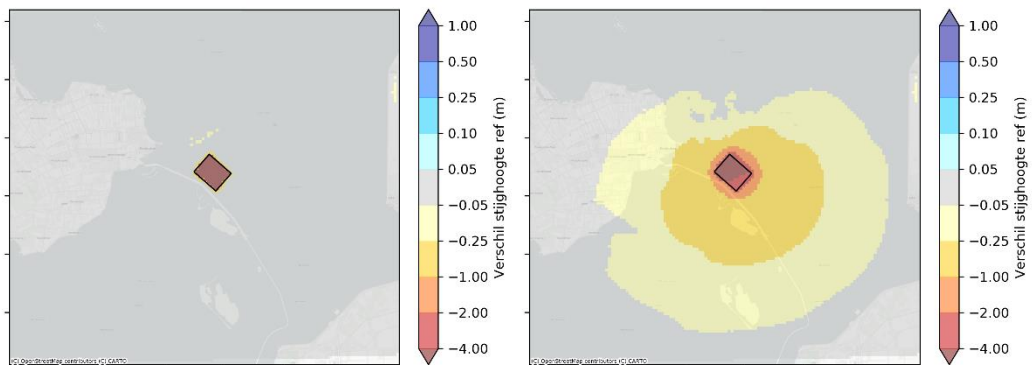
A.3.1 Stijghoogte

Op deze locatie is er flinke weerstand aanwezig tussen het IJsselmeer en het watervoerende pakket (10.000 dagen). Door het doorsnijden van deze weerstand neemt de stijghoogte ter plaatse van het voorraadbekken bij volledige vullingsgraad flink toe (ongeveer 1 m, Figuur 33). Bij volledige vullingsgraad is het peil in het voorraadbekken gelijk aan het gemiddelde IJsselmeerpeil (-0.3 m NAP). De verhoging straalt beperkt uit in het omliggende pakket.

Uitzakken van het waterpeil tot -5.3 m NAP leidt tot een grote verlagingskegel onder het IJsselmeer en Markermeer (Figuur 34). De verlaging rijkt tot onder West Friesland, maar heeft daar geen significante invloed op het freatische grondwater.



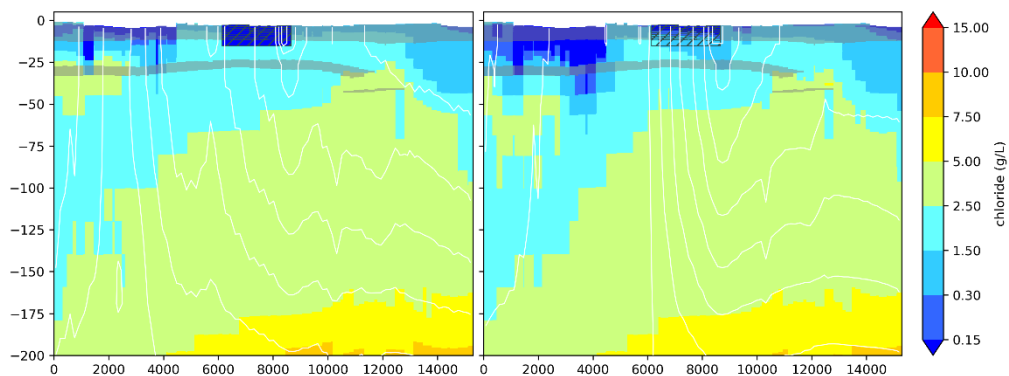
Figuur 33 Stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m NAP, links), en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket met situatie zonder voorraadbekken (m, rechts) bij waterpeil op gemiddeld IJsselmeerniveau (-0.3 m NAP).



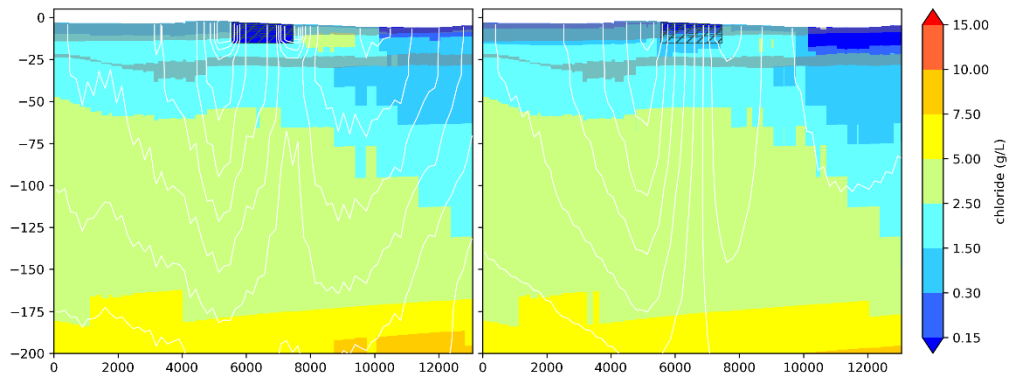
Figuur 34 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij volledig uitgezakt waterpeil in het bekken (-5.3 m NAP).

A.3.2 Verandering zoet-zoutverdeling

De verandering van de zoet-zoutverdeling is voor locatie 3 het meest beperkt. Over de 50-jarige rekenperiode verandert er relatief weinig. Het in- en uitstromen is voor locatie 3 het meest in evenwicht. Er ontstaat door dit cyclische in- en uitstromen een mengzone tussen de diepere delen van het voorraadbekken en het watervoerende pakket (Figuur 35, Figuur 36).



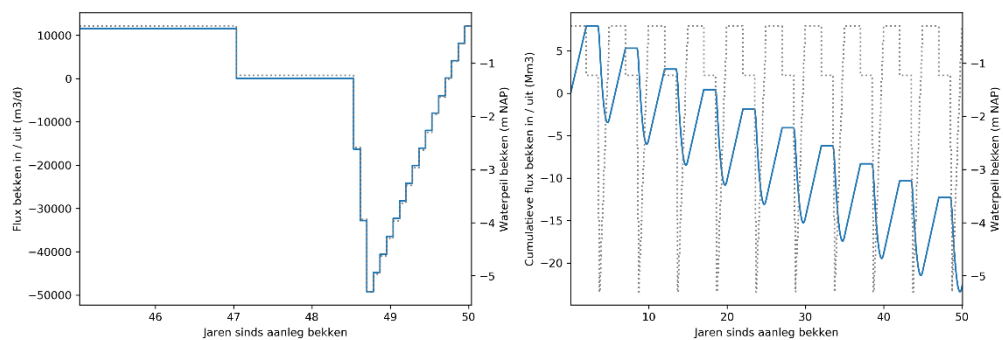
Figuur 35 Chlorideverdeling in het grondwater voor een west-oost doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.



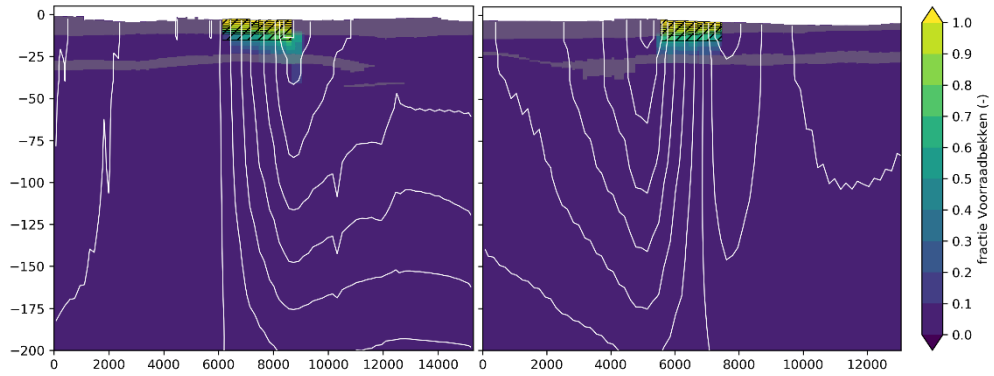
Figuur 36 Chlorideverdeling in het grondwater voor een zuid-noord doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.

A.3.3 Uitwisseling voorraadbekken en grondwater

Een voorraadbekken op locatie 3 verliest bij normaal waterpeil (-0.3 m NAP) zo'n 2.2 mm/d aan wegzijging naar het grondwater. Over de gehele vijfjarige waterpeilcyclus is de stroming evenwel netto in de richting van het voorraadbekken. Over deze vijf jaar stroomt er zo'n 2.4 Mm³ grondwater het voorraadbekken binnen (Figuur 37). Figuur 38 geeft de verspreiding van water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater. Hier is de mengzone zichtbaar die ontstaat door het heen- en weer stromen van het grondwater onder invloed van de waterpeilcyclus.



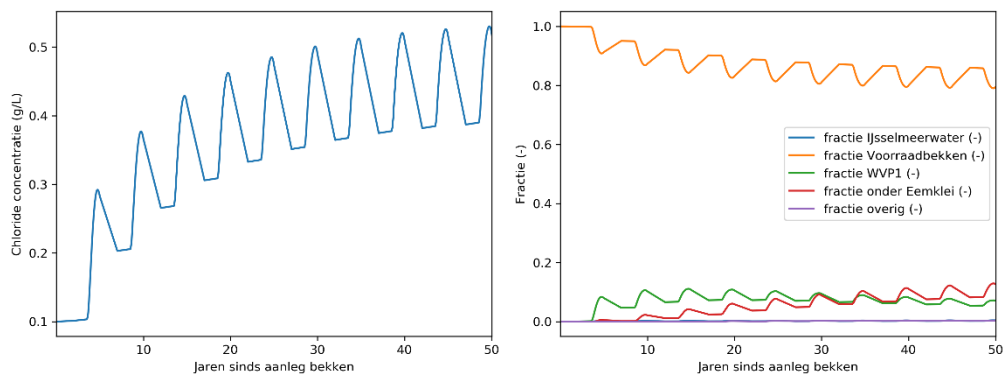
Figuur 37 Uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende één waterpeilcyclus (m³/d, links), en de cumulatieve uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende de 50-jarige rekenperiode (Mm³/d, rechts). Positieve waarden betekenen een uitstroom van water uit het bekken naar het grondwater. In de figuren is met een stippellijn ook het waterpeilverloop in het voorraadbekken aangegeven.



Figuur 38 Verspreiding water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater (als fractie van grondwater dat afkomstig is uit het voorraadbekken) aan het einde van de 50-jarige rekenperiode. Links voor een doorsnede in west-oostelijke richting over het voorraadbekken, rechts voor een doorsnede in zuid-noordelijke richting.

A.3.4 Samenstelling water in het voorraadbekken

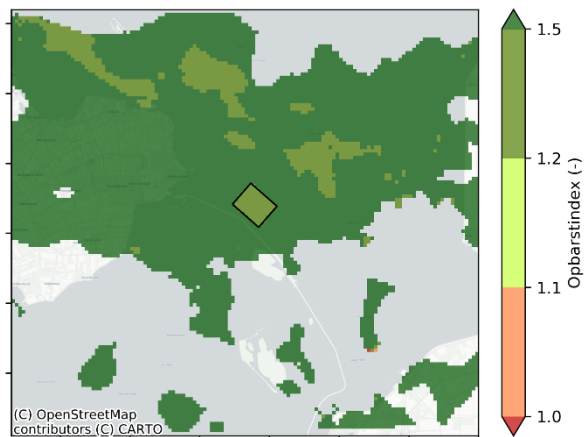
Door de netto toestroom van grondwater naar het voorraadbekken neemt de gemiddelde chlorideconcentratie in het bekken toe tot variërend 0.4 – 0.5 g/L. Het aandeel voorraadbekken-water neemt gedurende de rekenperiode af tot zo'n 80%. 20% is afkomstig van grondwater uit het eerste en tweede watervoerende pakket (fracties 'WVP1' en 'onder Eemklei'). Door de hoge weerstand onder het IJsselmeer stroomt op deze locatie geen IJsselmeerwater naar het voorraadbekken (Figuur 39).



Figuur 39 Verloop van de gemiddelde chlorideconcentratie (g/L, links) en gemiddelde herkomst van het water (fractie, rechts) in het water in het voorraadbekken gedurende de 50-jarige rekenperiode.

A.3.5 Opbarstrisico Eemklei

Op locatie 3 is tussen het voorraadbekken en de Eemklei nog zo'n 10 meter zand (watervoerend pakket) aanwezig. Hierdoor is de opdrijvende kracht onder de Eemklei niet groot genoeg om voor een groot opbarstingsrisico te zorgen (Figuur 40).



Figuur 40 Berekende opbarstindex van de Eemklei (Eek1) bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken (-5.3 m NAP).

A.4 Basisscenario - locatie 4

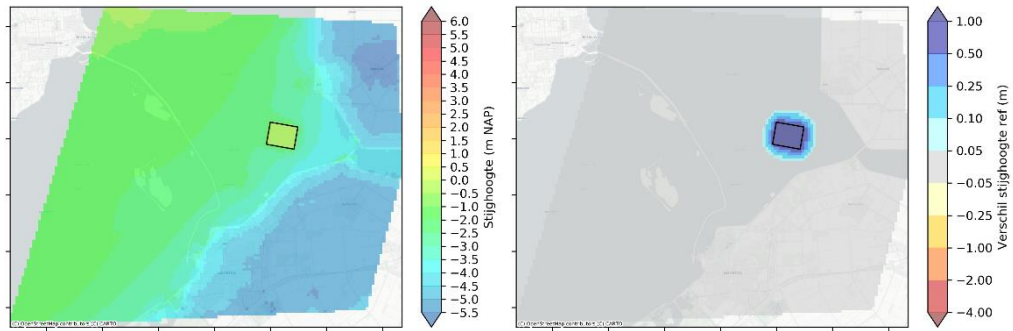
Locatie 4 bevindt zich bij voor de monding van het Ketelmeer, ten zuidwesten van Urk, op grotere afstand van land (tenminste 1.5 km) (Figuur 41).



Figuur 41 Ligging voorraadbekken locatie 4 (doorgetrokken zwarte lijn) en ligging getoonde doorsneden (gestippelde lijnen).

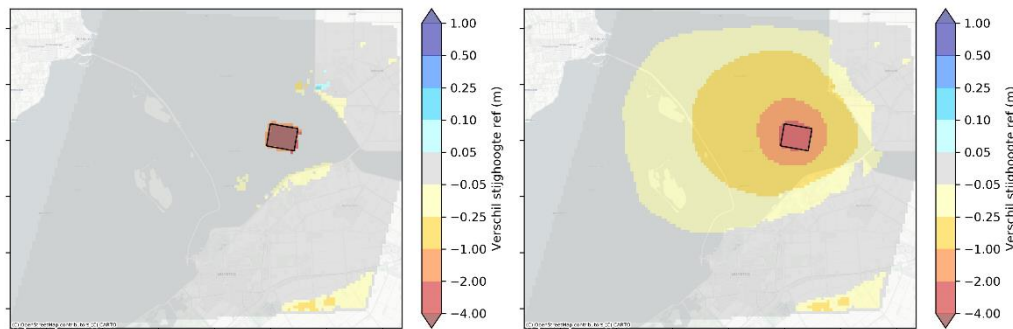
A.4.1 Stijghoogte

Op deze locatie is duidelijke weerstand aanwezig tussen het IJsselmeer en het watervoerende pakket (5.000 dagen). Daarnaast ligt deze locatie in de buurt van diepe Flevopolders, die de stijghoogte sterk beïnvloeden. Door het doorsnijden van de deklaagweerstand neemt de stijghoogte ter plaatse van het voorraadbekken bij volledige vullingsgraad flink toe (> 2 m, Figuur 43). Bij volledige vullingsgraad is het peil in het voorraadbekken gelijk aan het gemiddelde IJsselmeerpeil (-0.3 m NAP). De verhoging straalt in vergelijking tot de andere locaties verder uit in het omliggende pakket.



Figuur 42 Stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m NAP, links), en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket met situatie zonder voorraadbekken (m, rechts) bij waterpeil op gemiddeld IJsselmeerniveau (-0.3 m NAP).

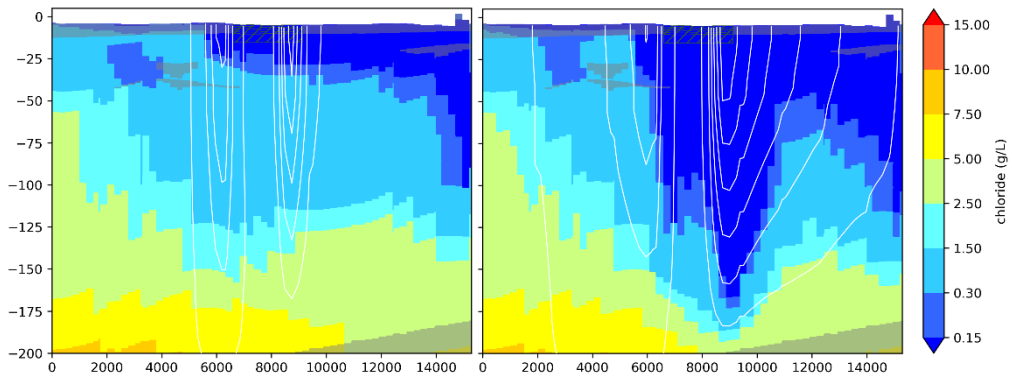
Bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken is het effect op de stijghoogte in het watervoerende pakket tot op grote afstand merkbaar (Figuur 43). Deze verlaging leidt tot effecten op het freatische grondwater in Flevoland en de Noordoostpolder. De verlagingsskegel in het watervoerende pakket komt vrij dicht bij de noordelijke modelrand. Het is niet uit te sluiten dat de modelrand het berekeningsresultaat beïnvloedt. De modelrand is evenwel ver genoeg verwijderd van het interessegebied om de verder gepresenteerde modelresultaten niet te beïnvloeden.



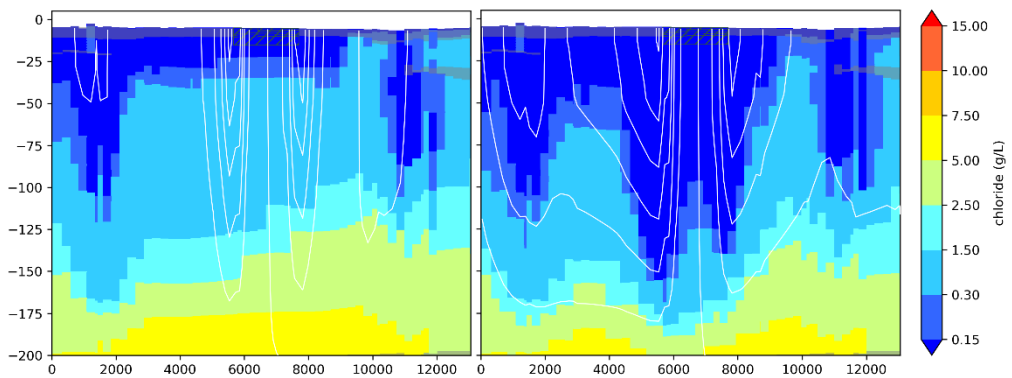
Figuur 43 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij volledig uitgezakt waterpeil in het bekken (-5.3 m NAP).

A.4.2 Verandering zoet-zoutverdeling

Door de sterke stijghoogtegradiënt zijgt bij normaal waterpeil veel water weg uit het voorraadbekken. Dit leidt tot grote diepte (-175 m NAP) tot een verzoeting van het grondwater (Figuur 44, Figuur 45).



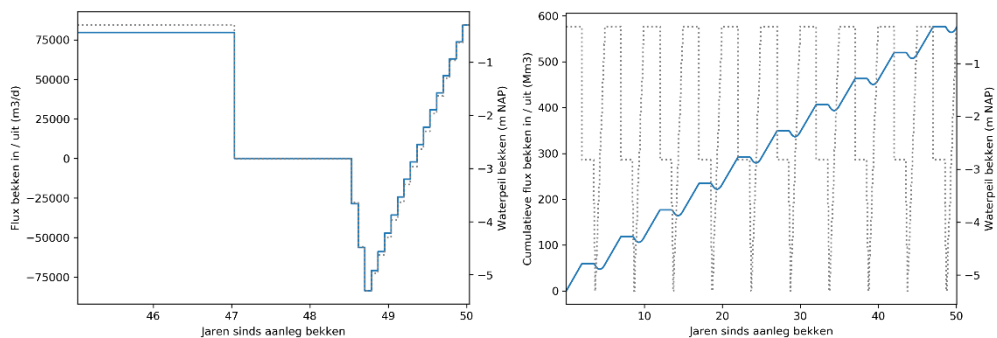
Figuur 44 Chlorideverdeling in het grondwater voor een west-oost doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.



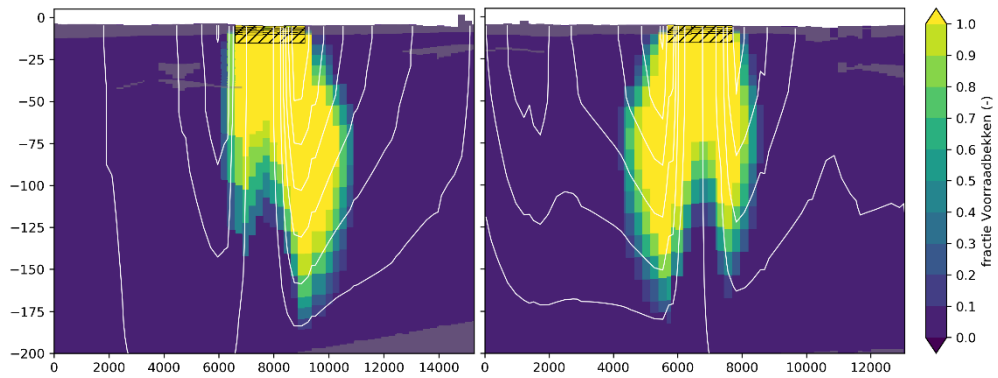
Figuur 45 Chlorideverdeling in het grondwater voor een zuid-noord doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.

A.4.3 Uitwisseling voorraadbekken en grondwater

Het voorraadbekken verliest op locatie 4 veel water dat wegzijgt naar het grondwater systeem. Bij normaal waterpeil wordt er 16 mm/d wegzijging berekend. Dit wordt ook niet gecompenseerd bij waterpeilverlagingen. Netto over een vijfjarige cyclus stroomt er 58 Mm³ weg uit het voorraadbekken naar het grondwater (Figuur 46). De verspreiding van dit water in het omliggende grondwater is duidelijk zichtbaar in Figuur 47; na 50 jaar bestaat het grondwater op grote diepte volledig uit water uit het voorraadbekken.



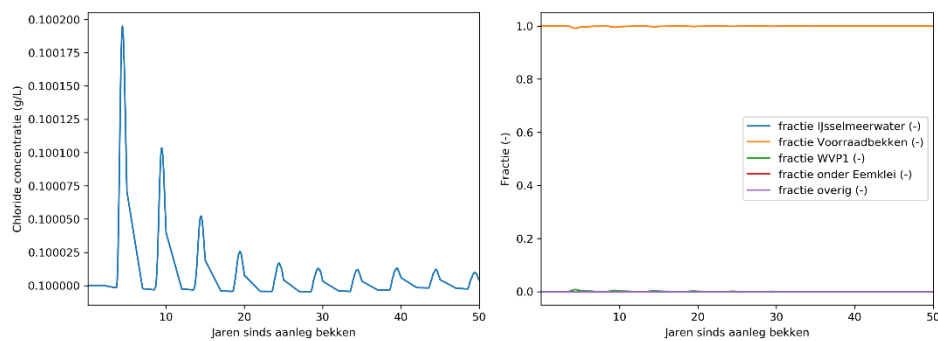
Figuur 46 Uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende één waterpeilcyclus (m³/d, links), en de cumulatieve uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende de 50-jarige rekenperiode (Mm³/d, rechts). Positieve waarden betekenen een uitstroom van water uit het bekkens naar het grondwater. In de figuren is met een stippellijn ook het waterpeilverloop in het voorraadbekken aangegeven.



Figuur 47 Verspreiding water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater (als fractie van grondwater dat afkomstig is uit het voorraadbekken) aan het einde van de 50-jarige rekenperiode. Links voor een doorsnede in west-oostelijke richting over het voorraadbekken, rechts voor een doorsnede in zuid-noordelijke richting.

A.4.4 Samenstelling water in het voorraadbekken

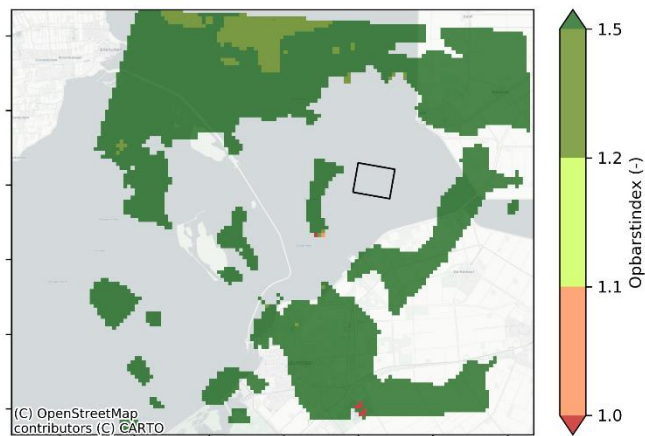
Figuur 48 geeft het verloop van de chlorideconcentratie en de herkomst van het water in het voorraadbekken weer. Op locatie 4 blijft het water in het voorraadbekken door de grote wegzijging bestaan uit ingebracht drinkwater. De chlorideconcentratie varieert dan ook niet merkbaar over de rekenperiode.



Figuur 48 Verloop van de gemiddelde chlorideconcentratie (g/L, links, let op de schaal) en gemiddelde herkomst van het water (fractie, rechts) in het water in het voorraadbekken gedurende de 50-jarige rekenperiode.

A.4.5 Opbarstrisico Eemklei

Op locatie 4 is geen Eemklei in de ondergrond aanwezig, er is dan ook geen opbarsting te verwachten (Figuur 49).

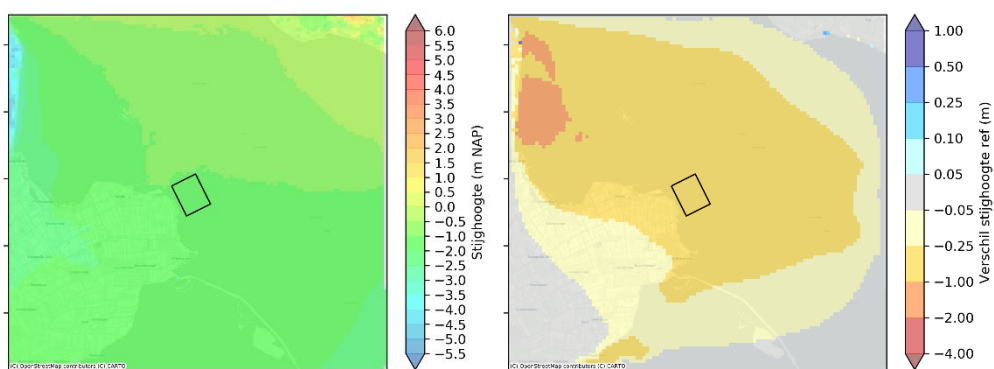


Figuur 49 Berekende opbarstindex van de Eemklei (Eek1) bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken (-5.3 m NAP).

B Resultaten vervolgsenario's

B.1 Referentieberekening vervolgsenario's

Door de verhoging van de deklaagweerstand onder het IJsselmeer wordt de stijghoogte in bijna het gehele modelgebied verlaagd (Figuur 50). De invloed van de lager gelegen polders op de stijghoogte neemt immers relatief toe ten opzichte van de invloed van het IJsselmeerpeil. De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket komt ter plaatse van het voorraadbekken in de referentiesituatie (voor aanleg van het bekken) uit op zo'n -1.1 m NAP.

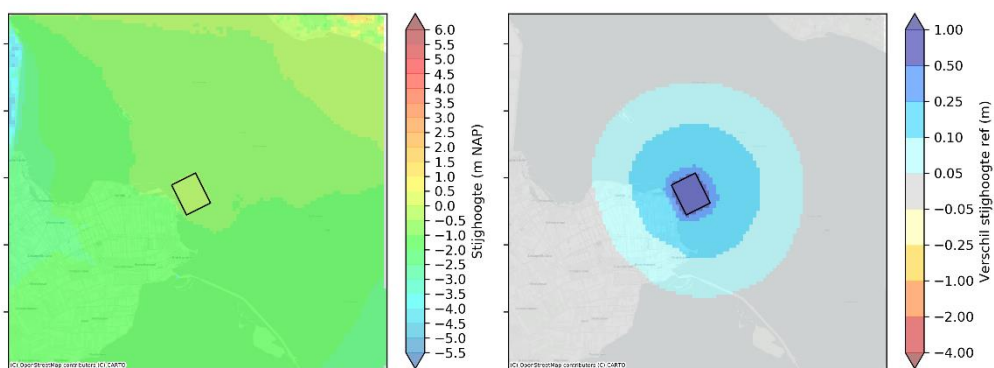


Figuur 50 Stijghoogte in het eerste watervoerende pakket na aanpassing deklaagweerstand IJsselmeer (m NAP, links), en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket met situatie voor aanpassing (m, rechts).

B.2 Vervolgsenario locatie 2 – regulier -0.3 m, maximaal -5.3 m NAP

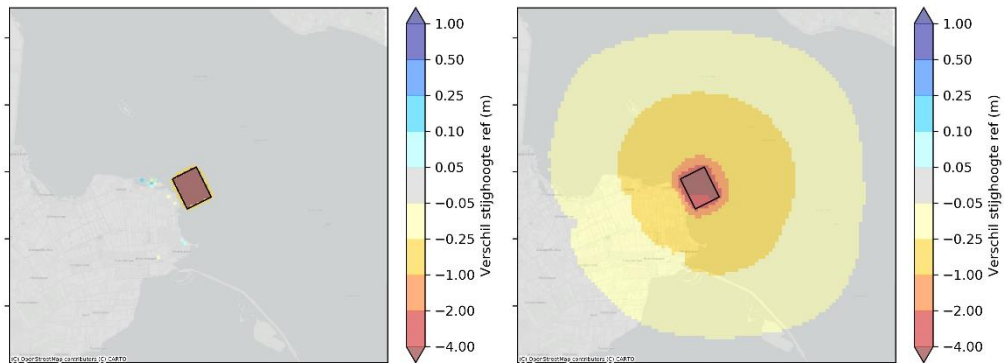
B.2.1 Stijghoogte

Na de aanpassing aan de deklaagweerstand is de weerstand tussen het IJsselmeer en het watervoerende pakket groot (10.000 dagen). Door het doorsnijden van de weerstand die wel aanwezig is, neemt de stijghoogte ter plaatse van het voorraadbekken bij volledige vullingsgraad flink toe (Figuur 51). Bij volledige vullingsgraad is het peil in het voorraadbekken gelijk aan het gemiddelde IJsselmeerpeil (-0.3 m NAP). De verhoging straalt door de hoge deklaagweerstand over flinke afstand uit in het omliggende pakket. Effecten op de freatische grondwaterstand zijn daarbij minimaal.



Figuur 51 Stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m NAP, links), en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket met situatie zonder voorraadbekken (m, rechts) bij waterpeil op gemiddeld IJsselmeerniveau (-0.3 m NAP).

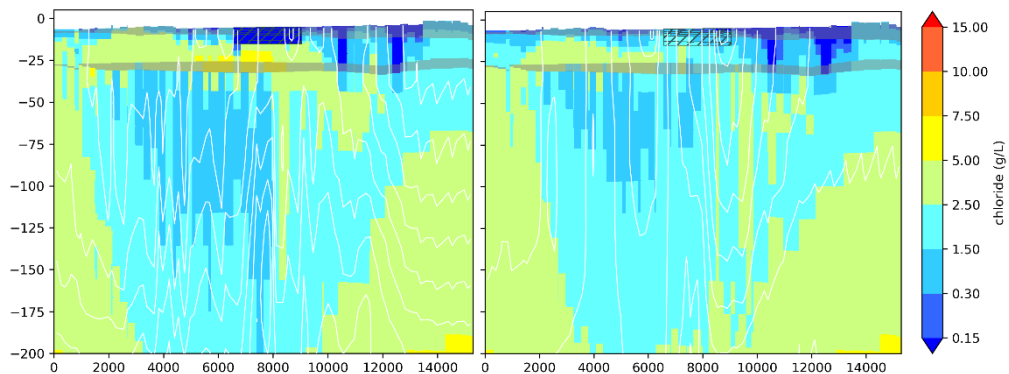
Bij minimale vullingsgraad van het bekken (-5.3 m NAP) wordt de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket tot zo'n 10 km landinwaarts merkbaar verlaagd. Deze effecten zijn niet merkbaar in het freatische grondwater in West-Friesland (Figuur 52).



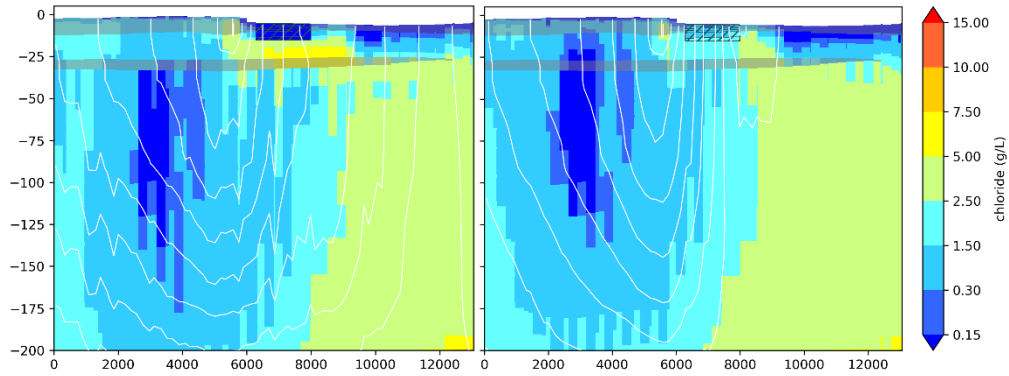
Figuur 52 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij volledig uitgezakt waterpeil in het bekken (-5.3 m NAP).

B.2.2 Verandering zoet-zoutverdeling

Voor locatie 2 is na aanpassing nog altijd sprake van een netto toestroom van grondwater naar het voorraadbekken. Deze is door de verhoogde weerstand evenwel sterk beperkt ten opzichte van het basisscenario voor deze locatie. Netto verplaatst grondwater uit de omgeving zich richting het voorraadbekken (Figuur 53, Figuur 54).



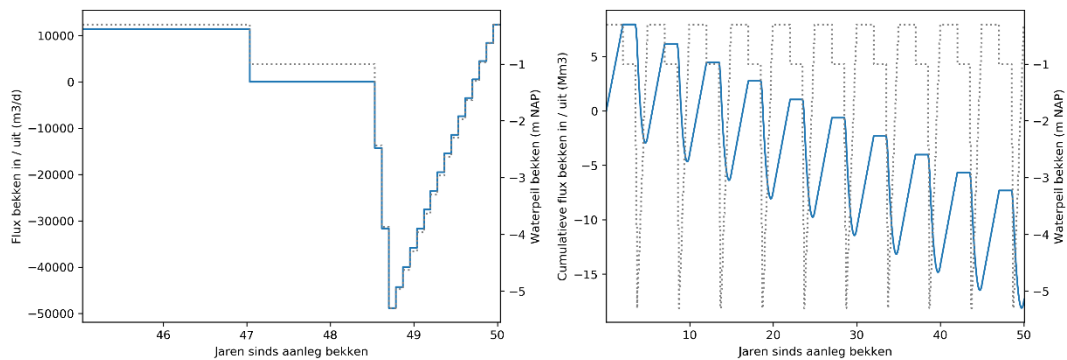
Figuur 53 Chlorideverdeling in het grondwater voor een noord-zuid doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.



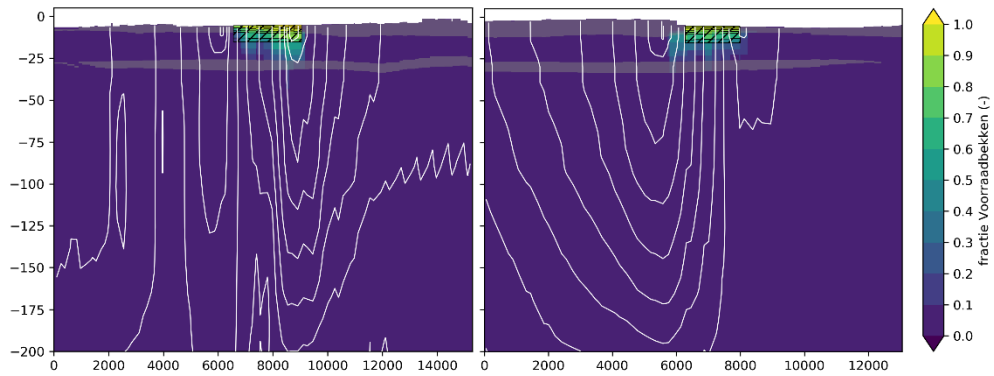
Figuur 54 Chlorideverdeling in het grondwater voor een west-oost doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.

B.2.3 Uitwisseling voorraadbekken en grondwater

De netto stroming richting het voorraadbekken is ook zichtbaar in Figuur 55 en Figuur 56. Waar bij normale vullingsgraad zo'n 2.2 mm/d wegzijgt naar het grondwater, stroomt over een vijfjarige cyclus zo'n 1,7 Mm³ aan grondwater het bekken in. Het water in het voorraadbekken bestaat na 50 jaar dan ook voor een deel uit grondwater (Figuur 56). De toestroom aan grondwater vindt beduidend langzamer plaats dan in het basisscenario voor deze locatie.



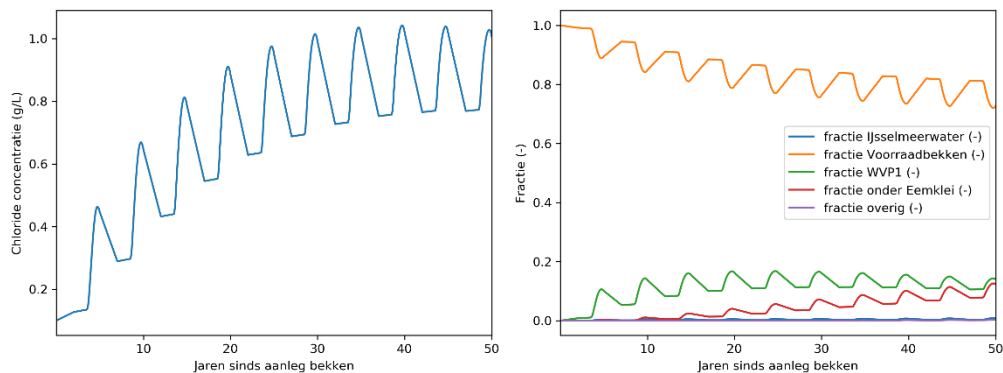
Figuur 55 Uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende één waterpeilcyclus (m³/d, links), en de cumulatieve uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende de 50-jarige rekenperiode (Mm³/d, rechts). Positieve waarden betekenen een uitstroom van water uit het bekken naar het grondwater. In de figuren is met een stippellijn ook het waterpeilverloop in het voorraadbekken aangegeven.



Figuur 56 Verspreiding water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater (als fractie van grondwater dat afkomstig is uit het voorraadbekken) aan het einde van de 50-jarige rekenperiode. Links voor een doorsnede in noord-zuidelijke richting over het voorraadbekken, rechts voor een doorsnede in west-oostelijke richting.

B.2.4 Samenstelling water in het voorraadbekken

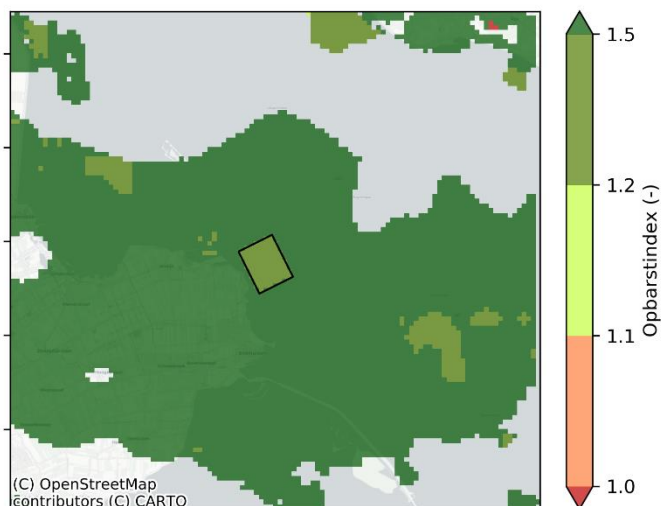
Door de netto toestroom van dieper brak grondwater naar het voorraadbekken neemt de gemiddelde chlorideconcentratie in het voorraadbekken toe tot uiteindelijk 0,8 - 1 g/L na 30 jaar. De fractie dieper grondwater (fracties 'WVP1' en 'onder Eemklei') is dan toegenomen tot zo'n 20%, het aandeel ingebracht drinkwater is afgenomen tot 80% (Figuur 57).



Figuur 57 Verloop van de gemiddelde chlorideconcentratie (g/L, links) en gemiddelde herkomst van het water (fractie, rechts) in het water in het voorraadbekken gedurende de 50-jarige rekenperiode.

B.2.5 Opbarstrisico Eemklei

Op locatie 2 is er tussen het voorraadbekken (-15 m NAP) en de Eemklei nog enkele meters zand (watervoerend pakket) aanwezig. Hierdoor is de opdrijvende kracht onder de Eemklei niet groot genoeg om voor een groot opbarstingsrisico te zorgen (Figuur 58).



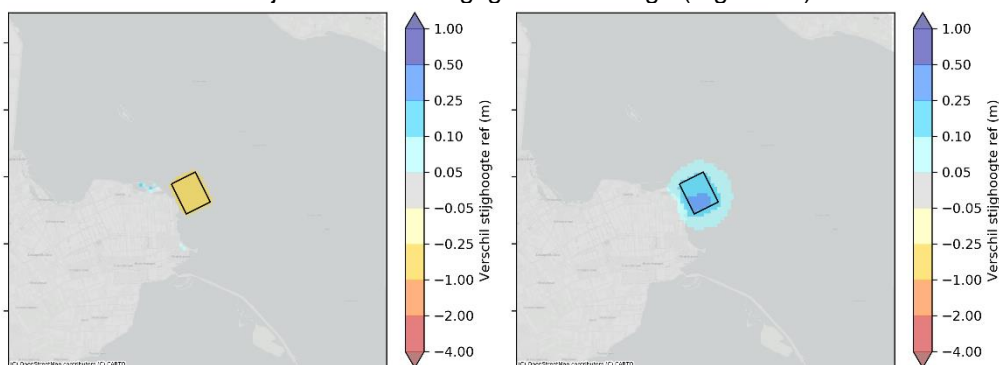
Figuur 58 Berekende opbarstindex van de Eemklei (Eek1) bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken (-5.3 m NAP).

B.3 Vervolgscenario locatie 2 – regulier -0.3 m, maximaal -1.0 m NAP

B.3.1 Stijghoogte

Effecten bij regulier waterpeil zijn gelijk aan Figuur 51.

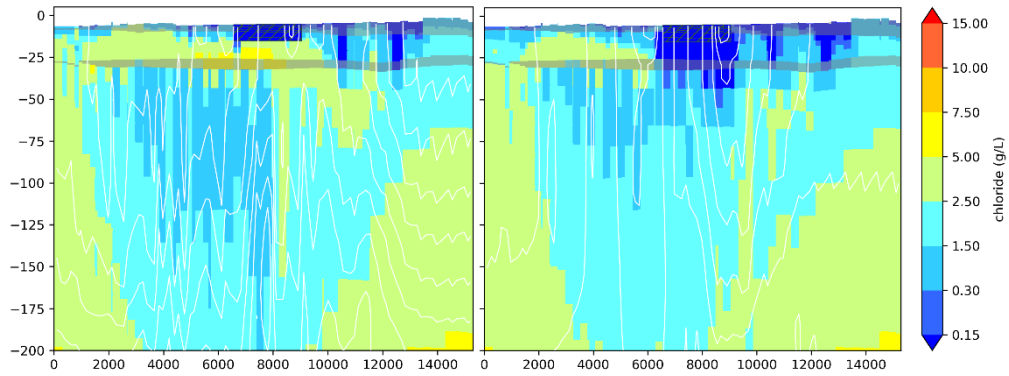
Ook bij minimale vullingsgraad van het bekken (-1 m NAP) ligt het waterpeil in het bekken nog boven de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. De stijghoogte wordt in dit scenario daarom ook bij minimale vullingsgraad verhoogd (Figuur 59).



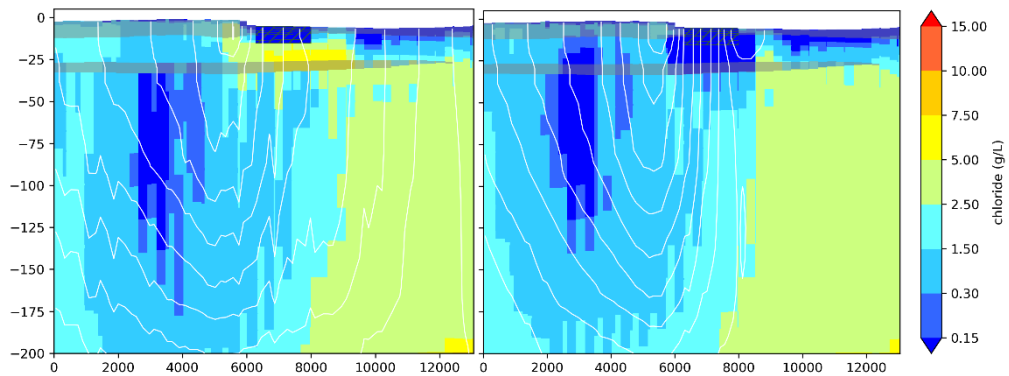
Figuur 59 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij volledig uitgezakt waterpeil in het bekken (-1 m NAP).

B.3.2 Verandering zoet-zoutverdeling

De het hogere minimumpeil in het bekken is er in dit scenario sprake van een continue wegzijging uit het voorraadbekken. Water uit het voorraadbekken stroomt langzaam in de richting van de polders van West-Friesland (Figuur 60, Figuur 61).



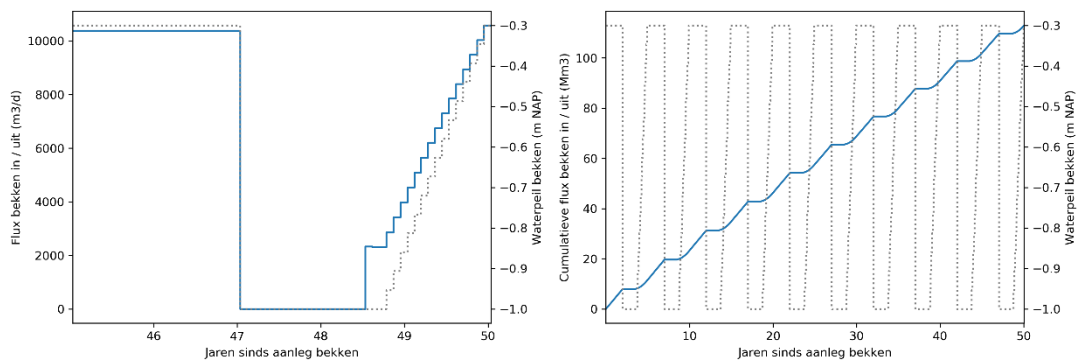
Figuur 60 Chlorideverdeling in het grondwater voor een noord-zuid doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.



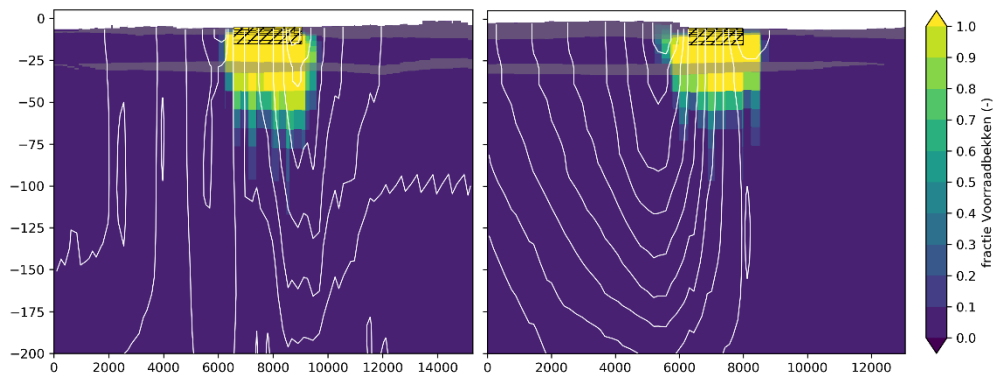
Figuur 61 Chlorideverdeling in het grondwater voor een west-oost doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.

B.3.3 Uitwisseling voorraadbekken en grondwater

Water zijgt continu weg uit het voorraadbekken (Figuur 62). De wegzijging bij normale vullingsgraad is gelijk aan het vorige scenario, zo'n 2.2 mm/d. Maar ook bij maximale uitzakking zijgt er nog altijd water weg, netto over de gehele cyclus zijgt er zo'n 11 Mm³ weg. Het water in het voorraadbekken bestaat, evenals het omringende grondwater, na 50 jaar dan ook volledig uit 'bekkenwater' (Figuur 63).



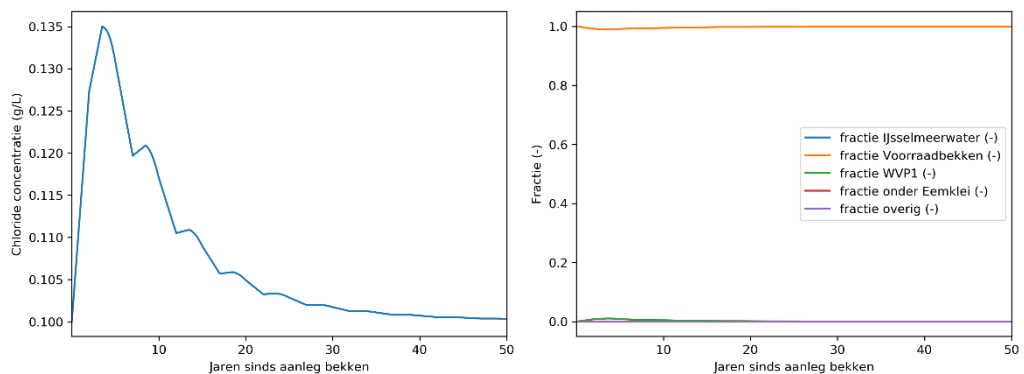
Figuur 62 Uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende één waterpeilcyclus (m³/d, links), en de cumulatieve uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende de 50-jarige rekenperiode (Mm³/d, rechts). Positieve waarden betekenen een uitstroom van water uit het bekken naar het grondwater. In de figuren is met een stippellijn ook het waterpeilverloop in het voorraadbekken aangegeven.



Figuur 63 Verspreiding water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater (als fractie van grondwater dat afkomstig is uit het voorraadbekken) aan het einde van de 50-jarige rekenperiode. Links voor een doorsnede in noord-zuidelijke richting over het voorraadbekken, rechts voor een doorsnede in west-oostelijke richting.

B.3.4 Samenstelling water in het voorraadbekken

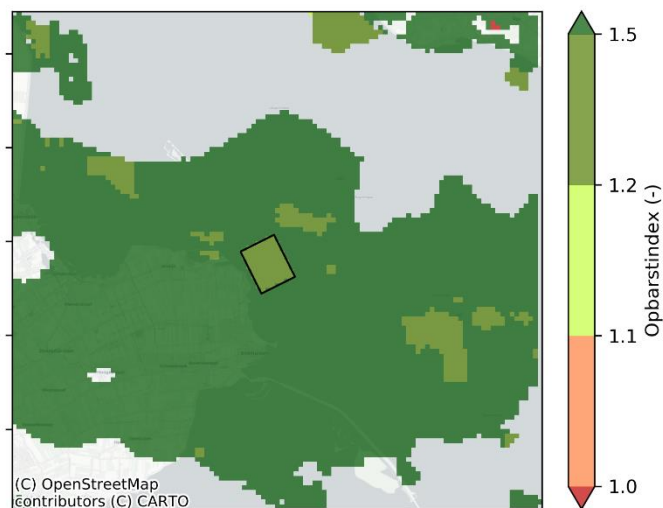
Het water in het voorraadbekken blijft over de modelperiode min of meer volledig 'bekkenwater', de chlorideconcentratie blijft constant 0,1 g/L (Figuur 64). Alleen in de eerste jaren is er een verhoging van de chlorideconcentratie merkbaar, doordat vermoedelijk door menging of dichtheidseffecten een beperkte hoeveelheid omringend grondwater het bekken in stroomt.



Figuur 64 Verloop van de gemiddelde chlorideconcentratie (g/L, links) en gemiddelde herkomst van het water (fractie, rechts) in het water in het voorraadbekken gedurende de 50-jarige rekenperiode.

B.3.5 Opbarstrisico Eemklei

Op locatie 2 is tussen het voorraadbekken (-15 m NAP) en de Eemklei nog enkele meters zand (watervoerend pakket) aanwezig. Hierdoor is de opdrijvende kracht onder de Eemklei niet groot genoeg om voor een groot opbarstingsrisico te zorgen (Figuur 65). Door het hoger blijvende waterpeil is de drijvende kracht voor opbarsting daarbij nog verkleind ten opzichte van het scenario met peiluitzakking tot -5.3 m NAP.

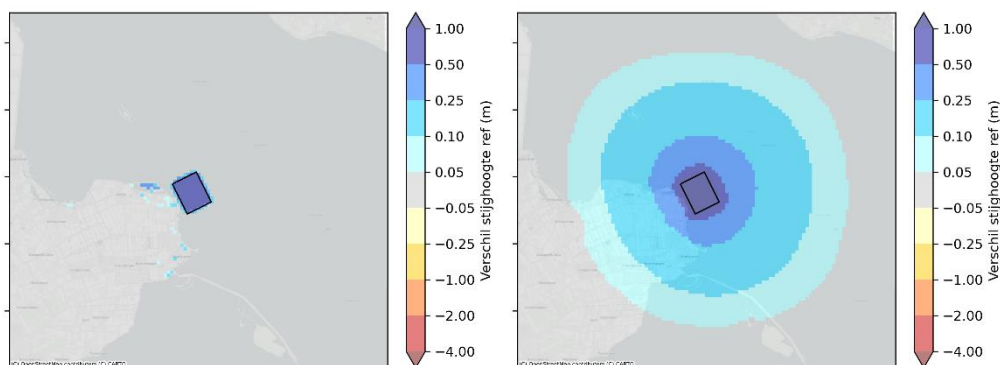


Figuur 65 Berekende opbarstindex van de Eemklei (Eek1) bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken (-5.3 m NAP).

B.4 Vervolgscenario locatie 2 – regulier +0.5 m, maximaal -3.0 m NAP

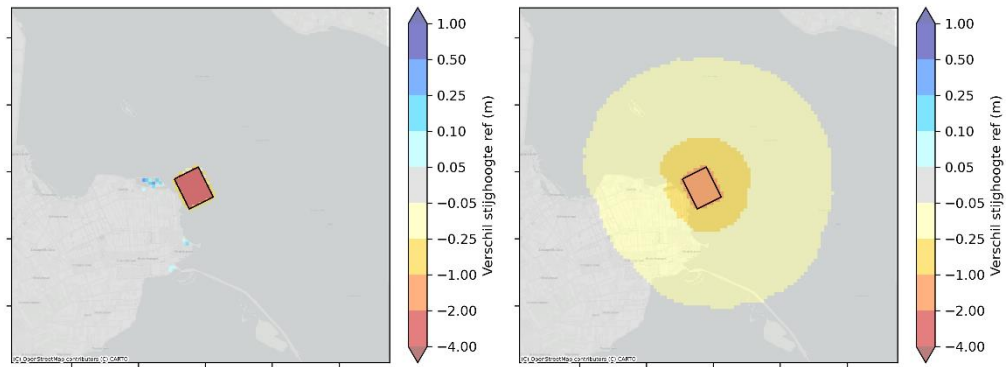
B.4.1 Stijghoogte

Door het verhoogde reguliere peil in het voorraadbekken ten opzichte van het IJsselmeerpeil (+0.5 m NAP), neemt de stijghoogte ter plaatse van het voorraadbekken bij volledige vullingsgraad flink toe (Figuur 66). De verhoging straalt door de hoge deklaagweerstand over flinke afstand uit in het omliggende pakket. Effecten op de freatische grondwaterstand lijken daarbij beperkt tot verhogingen langs de IJsselmeerdijk.



Figuur 66 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij waterpeil op regulier niveau (+0.5 m NAP).

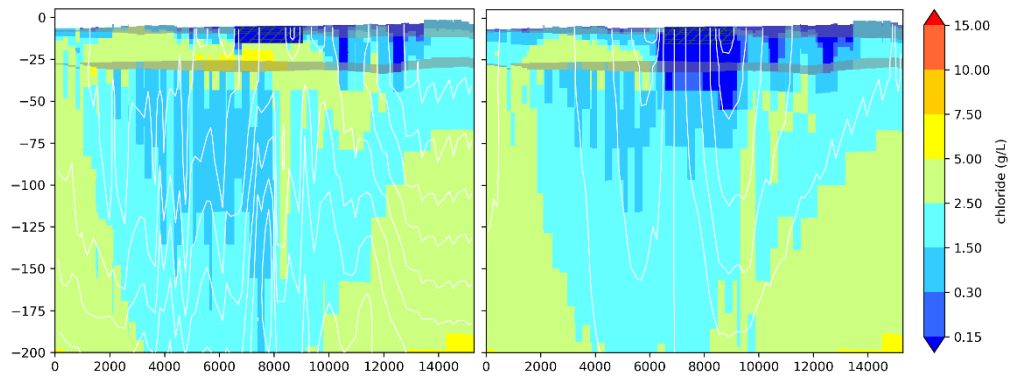
Bij minimale vullingsgraad van het bekken (-3 m NAP) wordt de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket tot zo'n 8 km landinwaarts merkbaar verlaagd. Deze effecten zijn zo goed als niet merkbaar in het freatische grondwater in West-Friesland (Figuur 67).



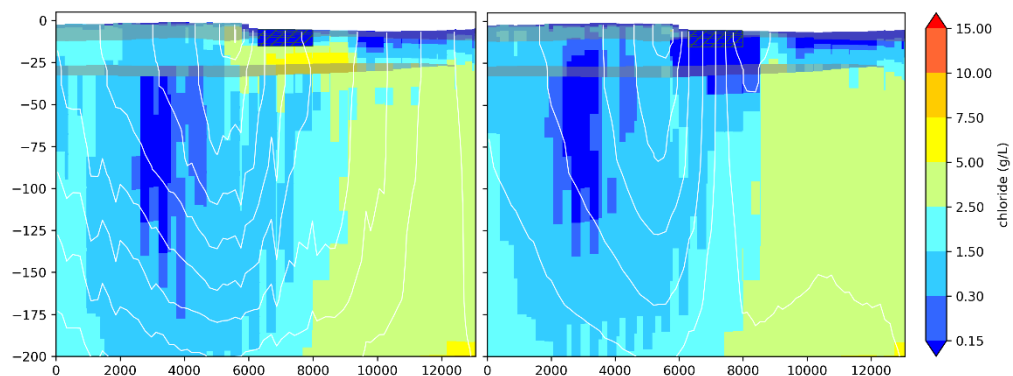
Figuur 67 Verschil in grondwaterstand (m, links) en verschil in stijghoogte in het eerste watervoerende pakket (m, rechts) met situatie zonder voorraadbekken bij volledig uitgezakt waterpeil in het bekken (-3 m NAP).

B.4.2 Verandering zoet-zoutverdeling

Door het verhoogde reguliere peil zigt er bij regulier peil veel water weg uit het bekken. Het grondwater verzoet vanuit het voorraadbekken (Figuur 68, Figuur 69).



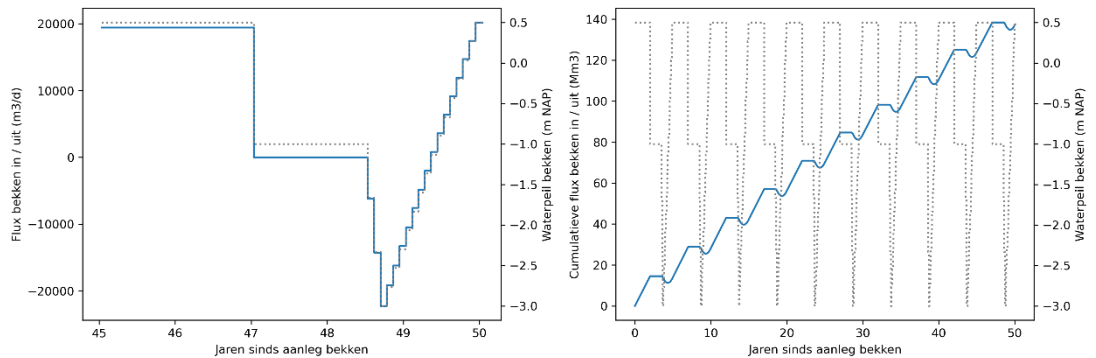
Figuur 68 Chlorideverdeling in het grondwater voor een noord-zuid doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.



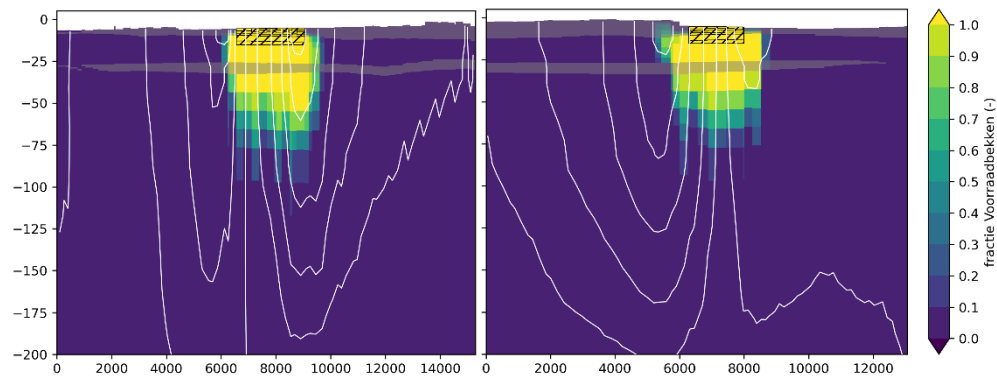
Figuur 69 Chlorideverdeling in het grondwater voor een west-oost doorsnede over het voorraadbekken (gearceerd), initieel (links) en na afloop van de 50-jarige rekenperiode (rechts). De witte lijnen zijn stroombanen en geven de grondwaterstroming op dat moment weer.

B.4.3 Uitwisseling voorraadbekken en grondwater

Door het verhoogde reguliere waterpeil neemt de wegzijging bij regulier peil toe tot zo'n 4 mm/d. Over een vijfjarige cyclus zijt netto zo'n 14 Mm³ aan water weg uit het voorraadbekken (Figuur 70). Het omliggende grondwater bestaat na 50 jaar dan ook tot zo'n 50m diepte uit water dat afkomstig is uit het voorraadbekken (Figuur 71).



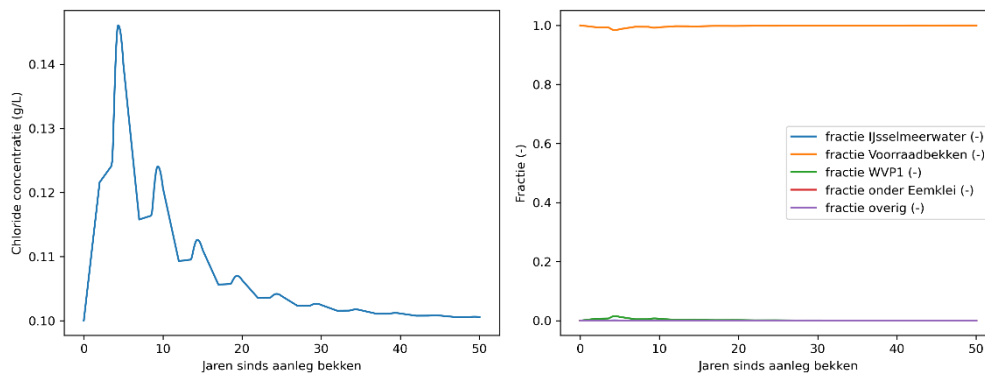
Figuur 70 Uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende één waterpeilcyclus (m³/d, links), en de cumulatieve uitwisseling tussen voorraadbekken en grondwater gedurende de 50-jarige rekenperiode (Mm³/d, rechts). Positieve waarden betekenen een uitstroom van water uit het bekken naar het grondwater. In de figuren is met een stippellijn ook het waterpeilverloop in het voorraadbekken aangegeven.



Figuur 71 Verspreiding water uit het voorraadbekken in het omliggende grondwater (als fractie van grondwater dat afkomstig is uit het voorraadbekken) aan het einde van de 50-jarige rekenperiode. Links voor een doorsnede in noord-zuidelijke richting over het voorraadbekken, rechts voor een doorsnede in west-oostelijke richting.

B.4.4 Samenstelling water in het voorraadbekken

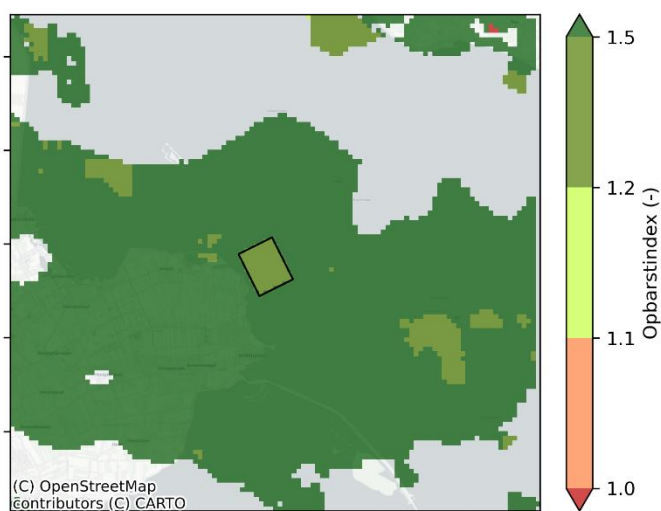
De netto wegzijging van water uit het voorraadbekken zorgt er voor dat het water in het voorraadbekken gedurende de modelperiode zo goed als volledig uit 'bekkenwater' blijft bestaan. Eerder naar het omliggende grondwater geïnfiltreerde water uit het bekken stroomt daarbij tijdens uitzakking van het peil terug naar het bekken: het watervoerend pakket fungeert als buffer. Het duurt een aantal cycli voordat geen origineel grondwater meer in het bekken stroomt, en de chlorideconcentratie constant 0,1 g/L blijft (Figuur 72).



Figuur 72 Verloop van de gemiddelde chlorideconcentratie (g/L, links) en gemiddelde herkomst van het water (fractie, rechts) in het water in het voorraadbekken gedurende de 50-jarige rekenperiode.

B.4.5 Opbarstrisico Eemklei

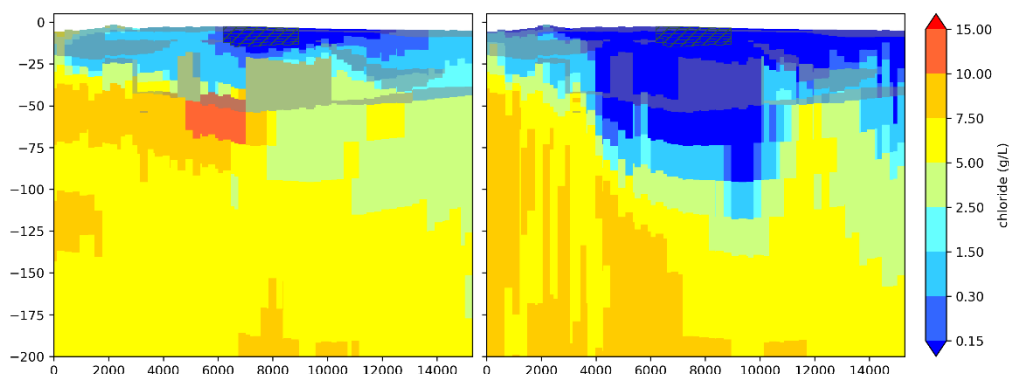
Op locatie 2 is er tussen het voorraadbekken (-15 m NAP) en de Eemklei nog enkele meters zand (watervoerend pakket) aanwezig. Hierdoor is de opdrijvende kracht onder de Eemklei niet groot genoeg om voor een groot opbarstingsrisico te zorgen (Figuur 73).



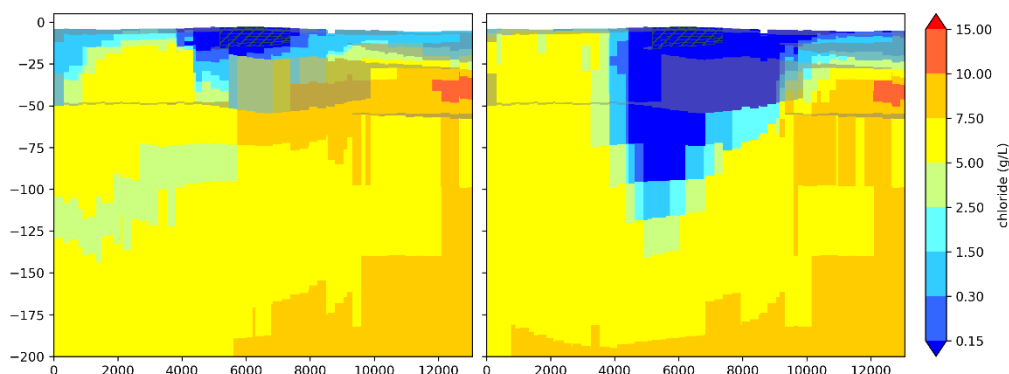
Figuur 73 Berekende opbarstindex van de Eemklei (Eek1) bij minimaal waterpeil in het voorraadbekken (-3 m NAP).

C Inspelen zoet-zoutverdeling IJsselmeer

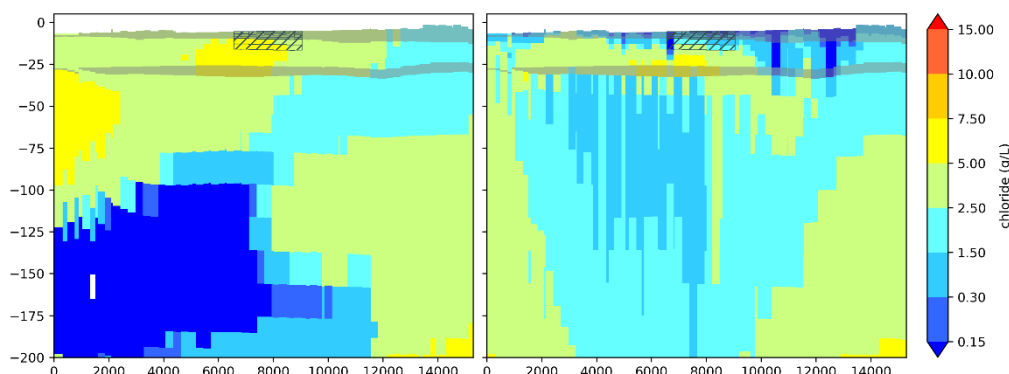
De locaties van de doorsneden over de vier bekkenlocaties zijn gegeven in Figuur 14 (locatie 1), Figuur 23 (locatie 2), Figuur 32 (locatie 3) en Figuur 41 (locatie 4).



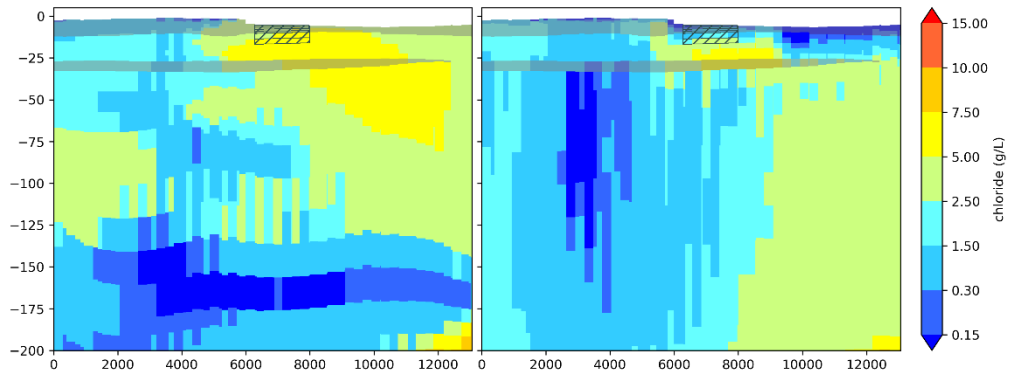
Figuur 74 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in noord-zuidelijke richting over voorraadbekken locatie 1.



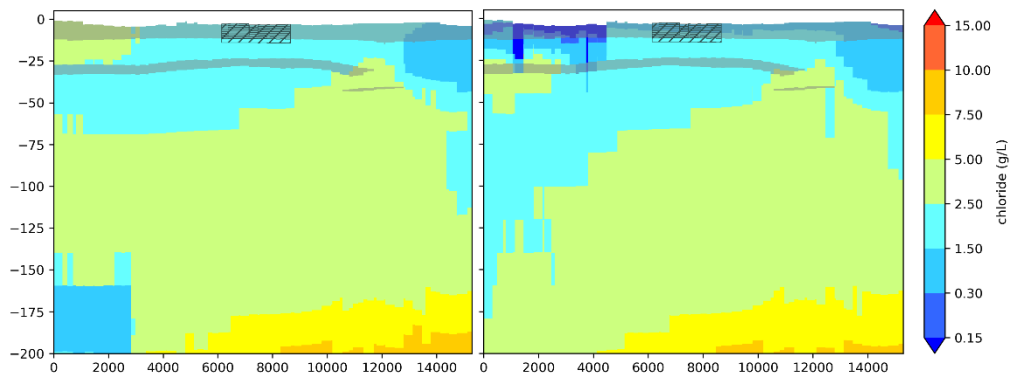
Figuur 75 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in west-oostelijke richting over voorraadbekken locatie 1.



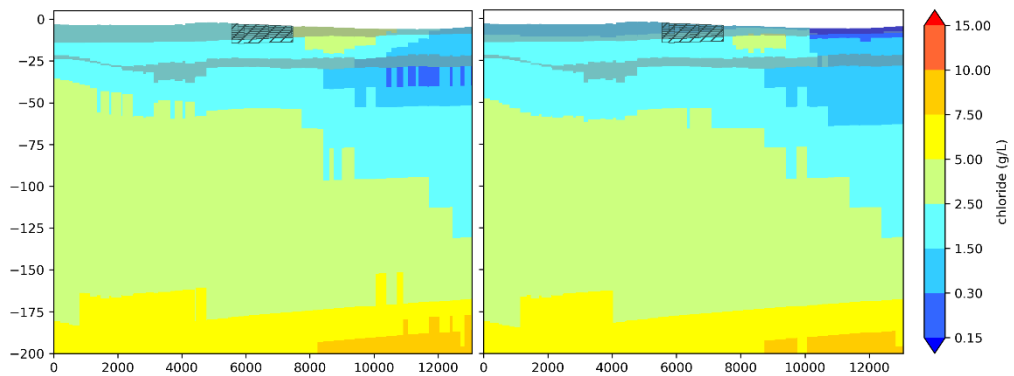
Figuur 76 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in noord-zuidelijke richting over voorraadbekken locatie 2.



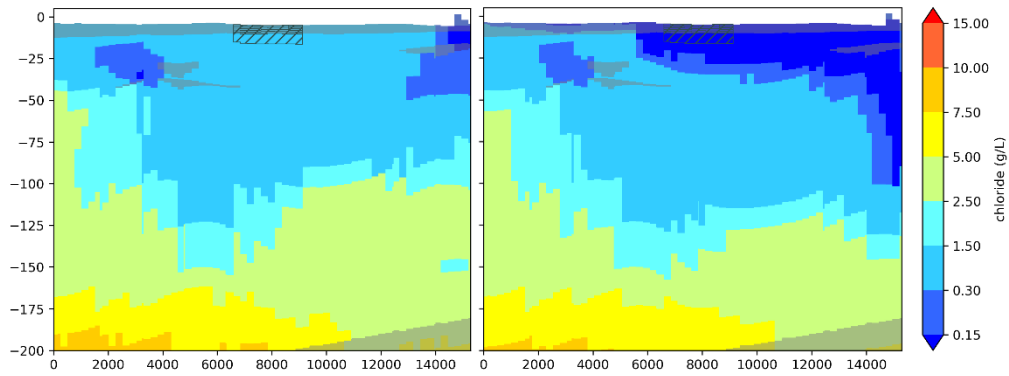
Figuur 77 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in west-oostelijke richting over voorraadbekken locatie 2.



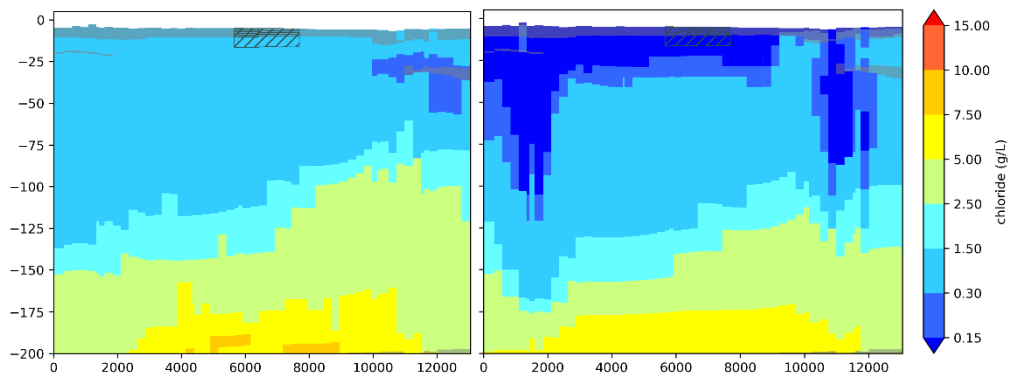
Figuur 78 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in west-oostelijke richting over voorraadbekken locatie 3.



Figuur 79 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in zuid-noordelijke richting over voorraadbekken locatie 3.



Figuur 80 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in west-oostelijke richting over voorraadbekken locatie 4.



Figuur 81 Chlorideconcentratie onder deklaag bij start (2000, links) en einde (2050, rechts) inspeelberekening, voor een doorsnede in zuid-noordelijke richting over voorraadbekken locatie 4.

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