

**Kennisprogramma Zeespiegelstijging**

# **Effecten zeespiegelstijging op zoetwater in de Nederlandse duinen**

Rapportnummer: 11210315-005-BGS-0001

## Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van het **Kennisprogramma Zeespiegelstijging**, een initiatief van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de deltacommissaris. Het programma levert kennis op over de gevolgen van zeespiegelstijging en hoe Nederland daarmee kan omgaan. Deze kennis wordt gebruikt bij de herijking van het Deltaprogramma in 2026.

Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op [kennisprogrammazeespiegelstijging.nl](https://kennisprogrammazeespiegelstijging.nl).

- Opsteller: *Deltares*
- Auteurs: *Gualbert Oude Essink, Guilherme Emidio Horta Nogueira*
- Geschreven in opdracht van *Rijkswaterstaat WVL* voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging
- December, 2024

## Effecten zeespiegelstijging op zoetwater in de Nederlandse duinen

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Verkeer- en Watermanagement, locatie Westraven
<b>Contactpersoon</b>	Jantine Hoekstra, Quirijn Lodder, Laura Brakenhoff
<b>Trefwoorden</b>	Zeespiegelstijging, kennisprogramma, spoor II, zoetwater, grondwater, verandering neerslagpatroon, duingebieden, Dunea, 3D en 2D zoet-zout grondwater modelleren

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	24-12-2024
<b>Projectnummer</b>	11210315-005
<b>Document ID</b>	11210315-005-BGS-0001
<b>Pagina's</b>	65
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Gualbert Oude Essink	
	Guilherme Emidio Horta Nogueira	

# Technische samenvatting

In deze studie zijn de effecten van zeespiegelstijging op het zoetwatervolume van de zoetwaterlenzen onder de Nederlandse duingebieden geanalyseerd. Daarnaast zijn andere factoren bekeken die mogelijk bijdragen aan veranderingen in het zoetwatervolume, zoals bodemdaling in de poldergebieden in het achterland, inundatie van de zoetwaterlens door overstroming van zout zeewater tijdens stormen, regenwater dat wordt afgevangen voordat het infiltreert in de ondergrond, zandsuppletie, extra grondwateraanvulling via voorgezuiverd rivierwater, het regime van grondwateronttrekkingen, variatie van geologie (watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen), een verandering in neerslag- en verdampingspatronen, en tenslotte het type vegetatie in de duinen.

## Methodologie

Een bestaand, fijnmazig 3D model van het duingebied van drinkwaterleidingbedrijf Dunea en negen conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen zijn gebruikt om de effecten te simuleren. De analyse met het 3D model omvatte scenario's voor zeespiegelstijging (0.5 m, 1.0 m en 3.0 m voor de zichtjaren 2100 en 2150), zandsuppletie met verhoogde duinen en kustuitbreiding, grondwateraanvulling (-3%, +3%, en +8%), bodemdaling (tot 0.4 m) in poldergebieden, en combinaties hiervan. Voor de initiële situatie is gebruik gemaakt van een zoet-zout verdeling gebaseerd op meetgegevens. Voor de analyse langs andere delen van de Hollandse kust en het Waddengebied zijn negen conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen opgesteld. Deze modellen bestrijken de kustlijn van Hoek van Holland tot Den Helder en twee Waddeneilanden (Terschelling en Ameland). De modellen bieden inzicht in variabelen zoals de breedte van het duingebied waar infiltratie plaatsvindt, grondwateraanvulling, en polderpeilen. Een zeespiegelstijging tot 3.0 m in 2150 (en 1.35 m in 2100) is gesimuleerd, met focus op de omvang en vorm van de zoetwaterlenzen en in mindere mate de zoutbelasting in de polders.

## Resultaten

De numerieke modellen bieden inzicht in factoren die het zoetwatervolume in kustduinen beïnvloeden (zie Tabel 1). Het zoetwatervolume in de kustduinen van het drinkwaterleidingbedrijf Dunea neemt aanzienlijk af naarmate de zeespiegel stijgt. Zonder zeespiegel is de afname in 2100 beperkt tot 2.5%, terwijl bij een stijging van 0.5 m en 1.0 m respectievelijk 4.0% en 5.7% verlies wordt waargenomen. Bij een extreme stijging van 3.0 m in 2150 bedraagt het verlies zelfs bijna 34%.

Tabel 1: Resultaten verandering zoetwatervolume bij het duingebied van Dunea van een aantal geselecteerde modelscenario's. Resultaten voor alle scenario's zijn te vinden in Bijlage 8A.3, pagina 63.

Scenario	Laatste simulatiejaar	Zoetwater volume [Mm <sup>3</sup> ]	Verandering t.o.v. referentie situatie
Referentiesituatie	2020	1057.0	
Geen zeespiegelstijging	2100	1030.3	-2.5%
Zeespiegelstijging 0.5m	2100	1015.0	-4.0%
Zeespiegelstijging 1.0m	2100	996.8	-5.7%
Zeespiegelstijging 3.0m	2150	701.7	-33.6%
Geen zeespiegelstijging + zandsuppletie	2100	1033.4	-2.2%
Zeespiegelstijging 0.5m + zandsuppletie	2100	1018.3	-3.7%
Zeespiegelstijging 1.0m + zandsuppletie	2100	1001.7	-5.2%
Geen zeespiegelstijging + bodemdaling	2100	1022.0	-3.3%
Combinatie scenario 01 (zeespiegelstijging 0.5m, bodemdaling, -3% grondwateraanvulling)	2100	1012.6	-4.2%
Combinatie scenario 02 (zeespiegelstijging 0.5m, bodemdaling, +3% grondwateraanvulling)	2100	1017.3	-3.8%

De diepte van het zoet-zout grensvlak verandert eveneens, waarbij het grensvlak bij een hogere zeespiegel gemiddeld ondieper wordt, vooral in de zuidwestelijke kuststrook. Regionale variaties treden op, waarbij sommige gebieden, zoals Berkheide, een lokale uitbreiding van de zoetwaterlens tonen. De uitbreiding van het kustfundament beperkt verzilting licht. Toename in grondwateraanvulling (+8%, zie Bijlage 8A.3, pagina 63) kan het effect van zeespiegelstijging deels compenseren. Daarentegen verergert een afname (-3%) de situatie. Bodemdaling in poldergebieden versnelt de verzilting door verhoogde zoutwaterinstroom vanuit zee. Scenario's met zowel zeespiegelstijging als bodemdaling tonen dat compensatie via zandsuppletie en verhoogde grondwateraanvulling essentieel is om de drinkwatervoorziening te waarborgen.

De negen conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen tonen aan dat een zeespiegelstijging van 3.0 m in 2150, en 1.35 m in 2100, aanzienlijke effecten heeft op de zoetwaterlens langs de Hollandse kust en de Waddeneilanden (zie Tabel 2). Tot 2100 blijven de meeste lenzen grotendeels intact, maar kleinere lenzen, zoals bij Hoek van Holland en Katwijk, krimpen tot 63% van hun oorspronkelijke volume. Tegen 2150 nemen de volumes van kleinere lenzen in diverse segmenten, en vooral op de Waddeneilanden, sterk af. Een lage maaiveldhoogte maakt gebieden kwetsbaarder, omdat regenwater bij hogere stijghoogten van de lens oppervlakkig afstroomt in plaats van infiltreert. Dit effect versterkt na 2100, vooral bij lagere maaivelden.

Tabel 2: Schatting verandering in zoete grondwaterreserves in de duinen langs de Nederlandse kust voor twee zichtwaarden: 2100 met een zeespiegelstijging van ~1.35 m en 2150 met een zeespiegelstijging van 3.0m.

Segment langs de Nederlandse kust	Lengte profiel langs de kust (km)	Grove schatting huidig zoetwater volume (Mm <sup>3</sup> )	Overgebleven volume, in 2100 (%)	Overgebleven volume, in 2150 (%)
A. Hoek van Holland-Kijkduin	15.0	35	63%	6%
B. Kijkduin-Katwijk	15.0	1070	86%	74%
C. Katwijk-Noordwijkerhout	12.5	30	77%	45%
D. Noordwijkerhout-IJmuiden	17.5	1150	97%	90%
E. Wijk aan Zee-Egmond	17.5	810	93%	83%
F. Egmond-Hondsbosche Zeewering	12.5	945	96%	90%
G. Hondsbosche Zeewering-Den Helder	22.5	250	87%	70%
H. Terschelling	17.5	350	95%	89-11%
I. Ameland	12.5	115	91%	83-0%

## Conclusies

Het zoetwatervolume in duingebieden wordt beïnvloed door een stijgende zeespiegel, maar pas bij een extreme zeespiegelstijging aanzienlijk. Bij extreme scenario's zoals 3.0 m stijging in 2150, zijn aanvullende maatregelen noodzakelijk. Zandsuppletie kan bijdragen om verzilting te beperken en zoetwatervolumes te behouden. Andere factoren zoals bodemdaling, minder grondwateraanvulling, en meer grondwater onttrekken dragen bij aan de effecten van een zeespiegelstijging op het zoetwatervolume.

## Aanbevelingen

Een gecoördineerde aanpak is essentieel om de zoetwatervoorziening in Nederlandse duingebieden te beschermen tegen zeespiegelstijging en andere bedreigingen. Dit vereist nader onderzoek met behulp van fijnmazige 3D-modellen voor andere duingebieden en verdere ontwikkeling van scenario's. Voor duurzame grondwaterreserves op de lange termijn moeten cumulatieve effecten van zeespiegelstijging, bodemdaling, zandsuppletie, grondwateraanvulling, effecten van klimaatverandering, grondwateronttrekkingen en Managed Aquifer Recharge (MAR) systemen worden meegenomen in de beleidsontwikkeling.

# Inhoudsopgave

<b>Technische samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>Inhoudsopgave</b>	<b>6</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1 Aanleiding	8
1.2 Onderzoeksdoel en aanpak op hoofdlijnen	8
1.3 Processen in het duingebied	10
1.4 Indeling van het rapport	15
<b>2 Methodiek 3D zoet-zout model</b>	<b>16</b>
2.1 Het Dunea studiegebied	16
2.2 Kenmerken van het 3D model	16
2.2.1 Gebruikte software IMOD-WQ	16
2.2.2 Ruimtelijke en temporele discretisatie	17
2.2.3 Geologisch model	17
2.2.4 Zoet-brak-zout grondwater verdeling	18
2.2.5 Hydrologische voorwaarden	19
2.3 Uitleg ontwikkelde scenario's	21
2.3.1 Zeespiegelstijging scenario's	23
2.3.2 Zandsuppletie scenario	24
2.3.3 Grondwateraanvulling scenario's	26
2.3.4 Bodemdaling scenario's	26
2.3.5 Gecombineerde scenario's	27
<b>3 Methodiek 2D zoet-zout profiel modellen</b>	<b>28</b>
<b>4 Resultaten van het 3D zoet-zout model</b>	<b>31</b>
4.1 Model van de referentiesituatie	31
4.2 Zeespiegelstijging scenario's	34
4.3 Zandsuppletie scenario	37
4.4 Bodemdaling scenario	39
4.5 Gecombineerde scenario's	40
4.6 Grondwateraanvulling scenario's	42
4.7 Gevoeligheid voor geologie	43
<b>5 Resultaten van de 2D zoet-zout profiel modellen</b>	<b>45</b>
<b>6 Discussie, conclusies en aanbevelingen</b>	<b>49</b>
6.1 Discussie	49
6.1.1 Onzekerheid in gebruikte modellen en invoergegevens	49
6.1.2 Analyse zout grondwater in de winputten	50

6.1.3	Compenserende maatregelen	50
6.2	Conclusies	52
6.3	Aanbevelingen	53
6.3.1	Algemene aanbevelingen	53
6.3.2	Voor verder onderzoek en modelontwikkeling	54
6.3.3	Specifiek voor vervolgberekeningen binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging	55
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>Bijlagen</b>	<b>61</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Tijdens fase 1 van de watersysteemverkenningen van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is in de Deltares studie van Delsman et al. (2022) onderzocht wat de effecten zijn van zeespiegelstijging op a. de grondwaterverziltting en b. de toename van de watervraag voor verziltingsbestrijding in de polders langs de Nederlandse kust. Dit onderzoek is samen met andere studies gebruikt om in fase 1 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging het effect van zeespiegelstijging op de zoetwaterbeschikbaarheid in het hoofdwatersysteem te verkennen. De resultaten hiervan zijn gepubliceerd in Delsman et al. (2022), en zijn hier beschikbaar:

<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemverkenningen-kennisprogramma-zeespiegelstijging>.

In West-Nederland bevinden zich ook belangrijke zoete grondwaterreserves in de duingebieden. Deze reserves zijn van belang voor de drinkwatervoorziening van miljoenen huishoudens en (kleinschalige) industriële activiteiten in het kustgebied. De effecten op de zoetwaterbeschikbaarheid vanuit deze systemen zijn eerder beknopt beschouwd in een eerste verkenning van de effecten van zeespiegelstijging (Haasnoot et al., 2018). De focus in deze verkenning lag op versnelde zeespiegelstijgingen (zelfs tot 8 meter in 2200). Destijds was nog geen informatie beschikbaar over de zandsuppleties volgens de huidige voorkeursstrategie (te weten het versterken van het kustfundament en het versterken en verhogen van de duinen). Dit is mogelijk een belangrijke factor die mede bepaalt hoe zeespiegelstijging de zoetwaterreserves in de duinen beïnvloedt.

In de Deltares studie van Delsman et al. (2022) zijn met het LHM zoet-zout modelinstrumentarium de duingebieden niet voldoende nauwkeurig berekend om uitspraken te kunnen doen over het effect van een zeespiegelstijging. Gedetailleerd onderzoek is daarom noodzakelijk geacht.

In deze fase 2 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (Spoor II, Zoet Water) kijkt Deltares aan de hand van modelberekeningen van het zoet-zout grondwater systeem op welke manier de zoetwaterreserves onder de duinen reageren op zeespiegelstijging en wat het effect is van zandsuppleties volgens de huidige voorkeursstrategie en andere factoren.

De resultaten van de modelberekeningen zijn in dit rapport vastgelegd en worden gebruikt door zowel het Kennisprogramma Zeespiegelstijging als KWR Water Research Institute, het onderzoeksinstituut van de waterbedrijven. Deze studie sluit aan bij recent onderzoek van KWR dat is uitgevoerd in opdracht van de waterbedrijven, en betreft de effecten van zeespiegelstijging en klimaatverandering op de drinkwatervoorziening vanuit de duinen. Deltares heeft extra modelberekeningen van het zoet-zout grondwater systeem in het kustgebied uitgevoerd en de resultaten geanalyseerd, met aandacht voor de impact op het zoete grondwaterreserves.

## 1.2 Onderzoeksdoel en aanpak op hoofdlijnen

Het doel van dit onderzoek is tweedelig:

1. het beoordelen van de effecten van verschillende scenario's van zeespiegelstijging (ZSS) op de ontwikkeling van de zoete grondwaterreserves in de duinen (hierna ook wel zoetwatervolume genoemd). De analyses betreft zowel 'natuurlijke' systemen als ook voor duingebieden waar water wordt geïnfilteerd en onttrokken;

2. inzichtelijk maken welke andere factoren mogelijk een rol kunnen spelen in (de verandering van de) zoete grondwatervoorraden in de duinen over de tijd. Hierbij is gedacht aan zandsuppletie aan de kust, (kunstmatige) grondwateraanvulling, maar ook ondergrond / geologische variaties, en het effect van bodemdaling in het binnenland.

Het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) zoet-zout model van Delsman et al. (2020, 2022) is overwogen om te worden ingezet, maar de modelresolutie (250 x 250 m<sup>2</sup>) van dit werd te grof geacht voor dit vraagstuk, waarbij bovendien de kalibratie van de duingebieden nog niet afdoende is. In het verleden zijn meerdere lokale tot regionale modelstudies uitgevoerd waarbij gekeken is naar de effecten van een zeespiegelstijging op zoetwaterlenzen in het Nederlandse kustgebied. Dit waren conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen (Oude Essink, 1996) tot recentere 3D modellen, zoals van de Waddeneilanden Texel (grof 3D model van Van Vugt et al. (2003)) en Terschelling (verfijnd 3D model van Vermeulen et al. (2024), van Zeeland (Van Baaren et al., 2016b), en van het kustgebied nabij de Zandmotor (Huizer et al., 2016).

Er liggen meerdere redenen ten grondslag waarom deze modellen niet zijn geselecteerd voor de analyse, zoals veroudering van het basismodel, een te grove resolutie, een gebrek aan representativiteit, een te klein modelgebied, of een combinatie hiervan. Er is gekozen om gebruik te maken van één bestaand, fijschalig en gekalibreerd model, mede wegens budgettaire redenen. Dit 3D model van het drinkwaterleidingbedrijf Dunea (o.a. Boonekamp et al., 2019) omvat een zoetwaterlens die benut wordt voor de drinkwatervoorziening van 1.4 miljoen inwoners in de regio. Het beslaat een gebied langs de Hollandse kust dat representatief is voor andere gebieden van drinkwaterleidingbedrijven zoals PWN en Waternet. Om een idee te krijgen hoe een zeespiegelstijging effect heeft op de overige Nederlandse duingebieden, is tevens gewerkt met 2D zoet-zout profiel modellen.

De twee typen modellen die zijn gebruikt in deze studie zijn:

#### **Ad 1. Een niet-stationair 3D zoet-zout model van het duingebied van Dunea**

De focus van deze studie voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is gelegd op het duingebied van Dunea (van Den Haag en omgeving), omdat voor deze regio een gekalibreerd model beschikbaar is dat de kennisvragen voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging goed kan beantwoorden. Het model maakt gebruik van de nieuwste numerieke parallele software en zoet-zout grondwater metingen door middel van zogenaamde airborne elektromagnetische data (zie o.a. Delsman et al. (2018) voor de achterliggende techniek).

In samenspraak met de opdrachtgever en consistent met andere zoetwaterstudies binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, zijn de volgende zichtwaarden voor zeespiegelstijging in het model opgenomen:

1. zeespiegelstijging scenario's voor het jaar 2100 van a. 0.0 m (geen zeespiegelstijging), b. 0.5 m en c. 1.0 m boven het huidige zeeniveau, en
2. zeespiegelstijging scenario voor het jaar 2150 van 3.0 m boven het huidige zeeniveau. Opgemerkt moet worden dat binnen reguliere KNMI'23-klimaatscenario's een (extreme) zeespiegelstijging van 3.0 m onder hoge uitstootsscenario's nog niet optreedt in het jaar 2150, maar pas rond 2200 (KNMI, 2023).

De zeespiegelstijging scenario's zijn in detail beschreven in paragraaf 2.3 (pagina 21). Tevens zijn zandsuppletie scenario's meegenomen om de zeewaartse uitbreiding van de duinen na te bootsen (zie paragraaf 2.3.2, pagina 24).

Daarnaast is het van belang te weten dat veranderingen in neerslag en verdamping, leidend tot een grondwateraanvulling in duingebieden aanzienlijk kunnen afwijken van de huidige gemiddelde Nederlandse situatie met voorspellingen van nattere omstandigheden langs de kust (d.w.z. meer neerslag en mogelijk een hogere grondwateraanvulling). Om daar rekening mee te houden is in deze studie een aanvullend scenario opgenomen dat uitgaat van een grotere toename van de grondwateraanvulling (zie tevens paragraaf 2.3, pagina 21).

## **Ad 2. Conceptuele modellen van negen 2D zoet-zout profielen langs de kust**

In een korte analyse is met behulp van negen conceptuele modellen van 2D zoet-zout profielen langs de Hollandse kust en het Waddengebied het effect van een zeespiegelstijging van 3.0 m in 2150 geanalyseerd. Deze methodiek is ook toegepast bij de eerste verkennende analyse van Haasnoot et al. (2018) waarbij met name extreme scenario's van zeespiegelstijging zijn doorgerekend. Met zeven 2D zoet-zout profiel modellen langs de Hollandse kust en twee op de eilanden in het Waddengebied is aandacht besteed aan het effect van de breedte van de duinstrook op het zoetwatervolume. Deze analyse biedt inzicht in de effecten van zeespiegelstijging in andere gebieden dan het drinkwaterwinningsgebied van Dunea.

De verwachte resultaten van dit onderzoek zijn:

1. tabellen, kaarten van het zoet-zout grensvlak en dwarsdoorsneden die de ontwikkeling van de zoetwaterlens onder verschillende zeespiegelstijgingen en andere factoren illustreren, en
2. karakteristieke kengetallen die de effecten van zeespiegelstijging en andere kwantificeren (bijv. miljoen m<sup>3</sup> zoet grondwater bij de verschillende zichtwaarden 2100 en 2150 met de daarbij horende zeespiegelstijging).

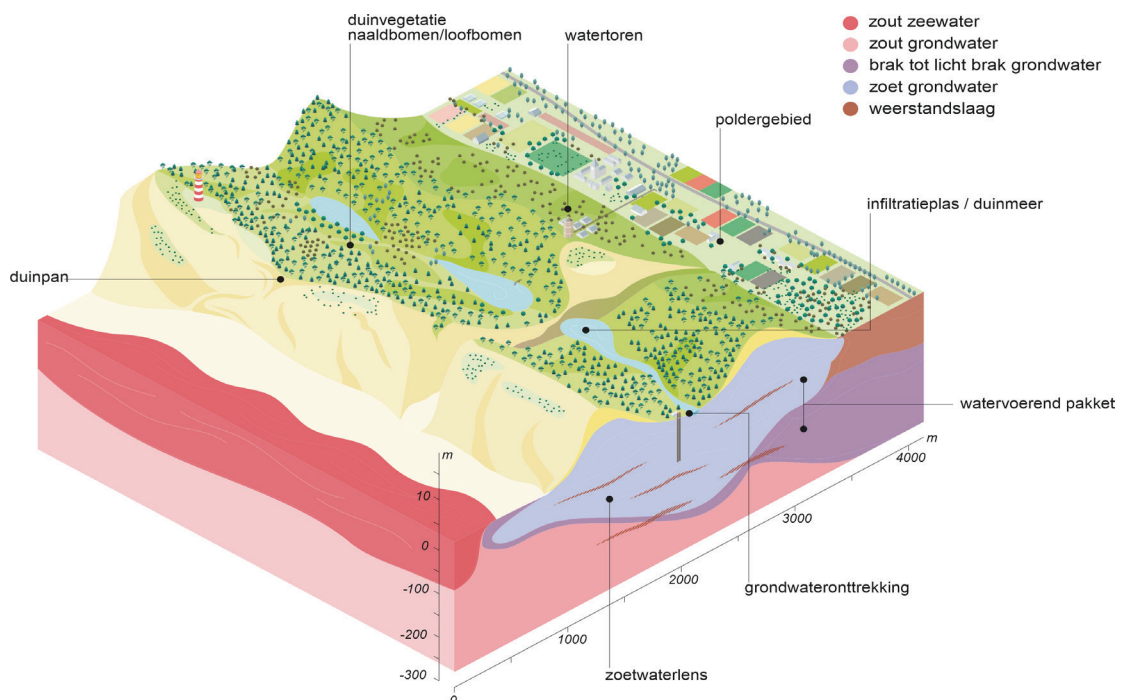
## **1.3 Processen in het duingebied**

De duinen in de Provincies Noord- en Zuid-Holland vormen een belangrijke natuurlijke barrière langs de kust, die bescherming biedt tegen overstromingen en een cruciale rol speelt in de drinkwatervoorziening. De breedte van de duinen varieert sterk, van 4.7 km in de Amsterdamse waterleidingduinen tot slechts 210 meter bij Monster. Daarnaast herbergen de duinen door hun variatie in omgevingsomstandigheden een grote biodiversiteit, wat heeft geleid tot hun aanwijzing als Natura2000-gebied. Naast hun ecologische waarde trekken de duinen op zonnige dagen veel recreanten (IJff et al., 2020).

Rond 2500 voor Christus ontstonden de eerste strandwallen en duinen langs de Nederlandse kust (Vos, 2015), waarbij zich in de ondergrond zoetwaterlenzen werden gevormd. Zo'n zoetwaterlens vormt een dynamisch stromingssysteem waarbij zoet regenwater infiltreert, zoet grondwater wordt, en geleidelijk afstroomt naar de uiteinden van de zoetwaterlens, al dan niet gemengd met brak en zout grondwater. Door dichtheidsverschillen blijft de zoetwaterlenzen drijven op het onderliggende brakke tot zoute grondwater (zie Figuur 1). De grondwatersnelheid neemt toe naar de uiteinden van de lens en manifesteert zich vaak aan het oppervlak van het strand als zoete tot licht-brakke kwel. Dit proces rondom zoetwaterlenzen is rondom 1900 voor het eerst in Nederland en Duitsland beschreven (Drabbe and Badon Ghijben, 1889; Herzberg, 1901; Post et al., 2018). Vooral het uittredende zoete, veelal nutriëntrijke kwel water heeft de laatste decennia veel aandacht gekregen als onderzoeksthema, bekend als Submarine Groundwater Discharge (Taniguchi, 2002; Taniguchi et al., 2019).

Doordat grondwateronttrekkingen toenamen sinds het begin van de vorige eeuw zijn veel zoetwaterlenzen in volume afgenomen. Er vond zelfs verzilting plaats in een aantal winputten door het opkegelen van brak tot zout grondwater (Stuyfzand, 1993). Vanaf eind jaren '50 van de vorige eeuw zijn de duinwaterleidingbedrijven begonnen kunstmatig (voorgezuiverd) rivierwater via infiltratieplassen toe te voegen aan het duinwater systeem. Bovendien is men grondwater gaan onttrekken van geringere diepten, met als gevolg dat de verzilting (van diepere winputten) een halt werd toegevoerd.

Het kan tientallen tot honderden jaren duren voordat een lens zich in een dynamische evenwichtssituatie bevindt, passend bij de dan geldende omstandigheden. De vorm van een zoetwaterlens is afhankelijk van parameters zoals de breedte van het duingebied waar regenwater infiltratie plaatsvindt, de geologische samenstelling van de ondergrond (bijv. de doorlatendheid van het watervoerend pakket), de mate van grondwateraanvulling, het relatieve dichtheidsverschil tussen zoet en zout grondwater, en de intensiteit van grondwateronttrekkingen (Oude Essink, 2001). In Bijlage 8A.4, pagina 64 is een analytische formule gegeven van een zoetwaterlens<sup>1</sup>.



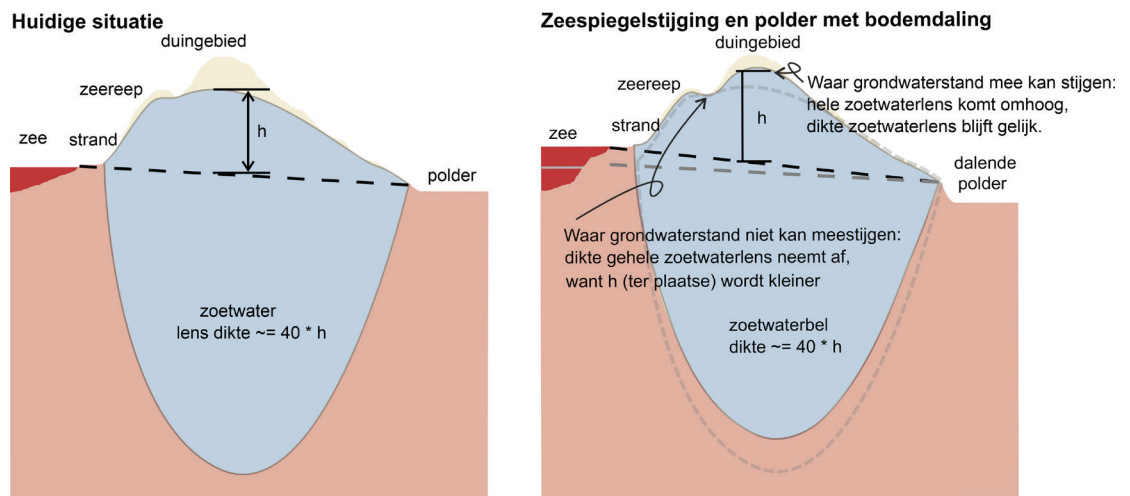
*Figuur 1: Schematisering van het zoet-zout grondwater systeem in het kustgebied; zoet grondwater kan worden onttrokken uit de zoetwaterlens die wordt gevoed door zoet regenwater en drijft op brakke tot zoute grondwater.*

<sup>1</sup> Om een gevoel te krijgen voor de invloed van verschillende factoren op de vorm van zoetwaterlenzen, zijn analytische vergelijkingen om de eerste orde grootte te bepalen. De vergelijkingen in de Bijlage 8A.4, pagina 64 tonen aan dat het theoretische volume van zoet grondwater in een zoetwaterlens evenredig is met het kwadraat van de breedte van het duingebied. Daarnaast is het volume van zoet grondwater evenredig aan de wortel van de grondwateraanvulling en omgekeerd evenredig aan de wortel van de hydraulische conductiviteit.

Hieronder worden enkele factoren kort beschreven van grondwaterprocessen die de vorm van een zoetwaterlens in het duingebied beïnvloeden (zie Figuur 3 voor een visualisatie van de verschillende processen):

### 1. Zeespiegelstijging

Een zeespiegelstijging verhoogt de druk op het grondwater aan de zeekant en als gevolg kan het volume van de zoetwaterlens door zoutwaterintrusie afnemen. De mate van afname van de zoetwaterlens is voornamelijk afhankelijk van maaiveldhoogte in het duingebied direct naast het strand en de zeereep (Figuur 2). Als de stijghoogte van de zoetwaterlens niet kan meestijgen met de zeespiegelstijging dan kan het zoetwatervolume flink afnemen omdat het regenwater in plaats van infiltreert afstroomt en geen grondwateraanvulling kan plaatsvinden. Dit speelt in het bijzonder bij duingebieden met een relatief lage maaiveldhoogte. Bovendien zal door het toenemende verschil in stijghoogte aan beide zijden van de zoetwaterlens de freatische waterscheiding van het duingebied in beperkte mate verschuiven richting de zee.



Figuur 2: De vorm van de zoetwaterlens onder een zeespiegelstijging hangt af van de hoogte van het maaiveld (uit: IJff et al., 2020). Links een schematisatie van de huidige situatie. Rechts laat de situatie zien onder invloed van een zeespiegelstijging. De grondwaterstand in de zeereep kan niet volledig meestijgen met de zeespiegelstijging en de gehele zoetwaterlens wordt kleiner; het regenwater kan niet infiltreren, een deel van de grondwateraanvulling kan de zoetwaterlens niet voeden en wordt deels afgevangen door oppervlakte drainage.

### 2. Bodemdaling

Laaggelegen poldergebieden in het achterland beïnvloeden momenteel eveneens de vorm van de zoetwaterlens. Door het verschil in stijghoogte kan zout grondwater vanuit zee het watervoerend pakket binnendringen en afstromen naar het poldergebied. Bovendien kan bodemdaling, door een combinatie met een verdere verlaging van de drainagebasis en de daaropvolgende aanpassing van de polderpeilen, leiden tot een versnelling van het verziltingsproces. In principe maakt een dalend poldergebied deel uit van de relatieve zeespiegelstijging. Net zoals onder factor 'Zeespiegelstijging' zal de waterscheiding verschuiven richting de zee.

### 3. Inundatie zoetwaterlens door overstroming zeewater tijdens stormen

Bij dit proces stroomt zout zeewater tijdens stormen, eventueel in combinatie met hoog water voorbij het strand op de zeereep of meer landinwaarts in de sluffers. Dit zeewater kan vervolgens bij de juiste geologische condities snel infiltreren in de ondergrond waarbij dichtheidseffecten tussen zout en zoet grondwater een rol speelt. Het onderliggende zoete grondwater kan daarbij verzilt en lange tijd brak tot zout blijven

ongeschikt voor de drinkwaterwinning. Wereldwijd is dit een bekend verschijnsel en in literatuur goed vastgelegd (Cantelon et al., 2023; Huizer et al., 2017; Paldor and Michael, 2021; Yang et al., 2018, 2013; Yu et al., 2016).

**4. Regenwater wordt afgevangen voordat het infiltreert in de ondergrond**

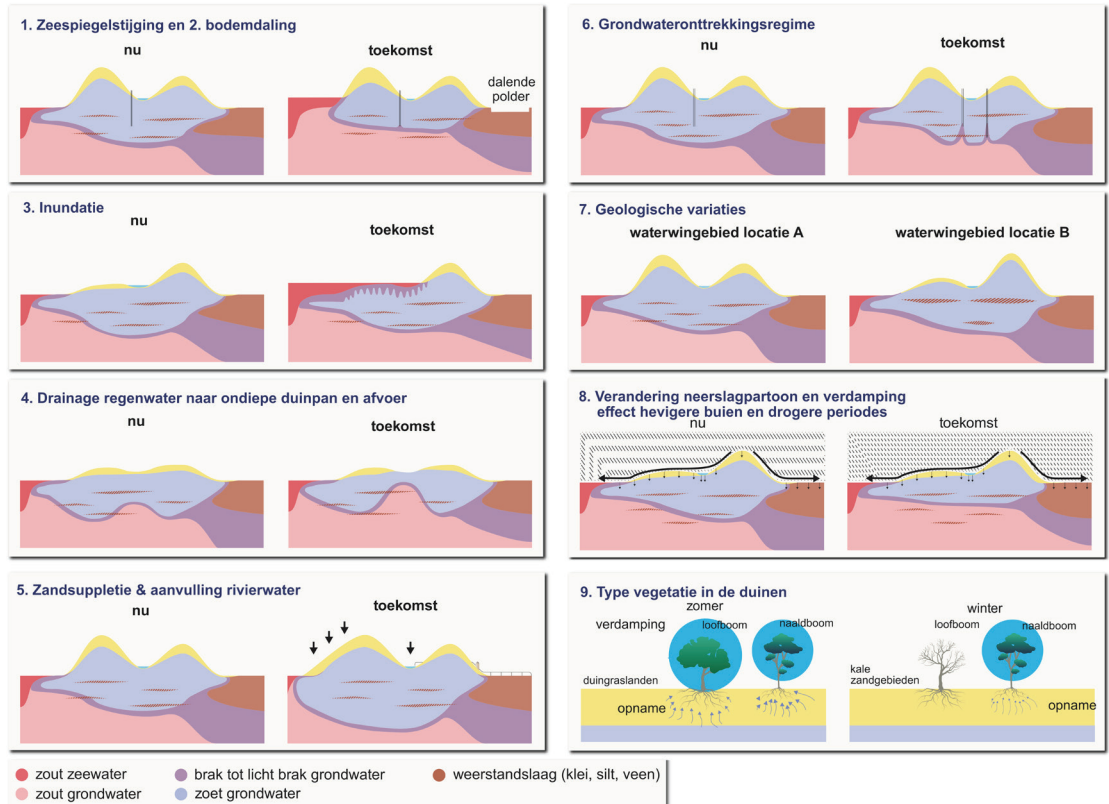
Regenwater dat normaal gesproken infiltreert in de zandige duinen kan in ondiepe duinpannen afgevangen worden. Vandaaruit kan het verder afstromen of verdampen voordat het de ondergrond instroomt. Minder grondwateraanvulling zal leiden tot een kleinere zoetwaterlens.

**5. Zandsuppletie en extra grondwateraanvulling via voorgezuiverd rivierwater**

Bij zandsuppletie kan ter plaatse regenwater infiltreren, waarbij het geïnfiltreerde water bijdraagt aan een grotere lens. Als bovendien de grondwateraanvulling kunstmatig extra wordt aangevuld door voorgezuiverd rivierwater neemt de totale grondwateraanvulling toe en kan de zoetwaterlens en het zoetwatervolume groter worden. Theoretisch neemt het volume van de zoetwaterlens kwadratisch toe met de breedte van het infiltratiegebied, en met de wortel van de grondwateraanvulling (zie Bijlage 8A.4, pagina 64). Zo betekent een 2 keer zo grote grondwateraanvulling dat het zoetwatervolume op termijn ongeveer 1.4 keer (wortel 2) zo groot is.

**6. Grondwateronttrekkingsregime**

Het zoete grondwater dat onttrokken wordt komt niet ten goede aan de vorming van een natuurlijke zoetwaterlens. Lokaal kan dieper, zouter grondwater aangetrokken worden naar de winputten ('opkegelen van brak tot zout grondwater') waarbij het onttrokken grondwater uit de winputten een zoutconcentratie heeft die boven de norm uitkomt. De winput is dan verzilt en niet meer bruikbaar. Het verzilten van een grondwater systeem door opkegeling kan een snel proces zijn terwijl het verzoeten na het stopzetten van de onttrekking veel langer kan duren. Tijdens de grondwaterwinning zijn de grondwatersnelheden groot en vindt veel menging van zoet en zout grondwater plaats. Het brakke grondwater blijft na stopzetting van de winning langer in het grondwater systeem aanwezig.



Figuur 3: Schematisatie van verschillende processen die bijdragen aan de verandering van zoetwaterlenzen over de tijd.

## 7. Geologische variaties

De samenstelling van de ondergrond is van belang voor de vorming en behoud van zoetwaterlenzen. Een te ondiepe slecht doorlatende kleilaag aan de onderkant van het grondwater systeem kan zorgen dat het volume van de zoetwaterlens niet groot genoeg kan worden; een ondiepe weerstand biedende kleilaag zorgt ervoor dat er nauwelijks grondwateraanvulling kan plaatsvinden. Kleilagen kunnen zich uitstrekken tot onder de zeebodem en hebben effect op hoe het zoete grondwater afstroomt. Dit proces van zogenaamde ‘submarine groundwater discharge’ (zie o.a. Taniguchi et al., 2019) is van belang in veel kustgebieden maar minder van toepassing in Nederland.

## 8. Veranderend patroon in neerslag en verdamping<sup>2</sup>

Te veel regenwater uit kortdurende intensievere buien kan afhankelijk van het bodemtype en de vegetatie niet op tijd infiltreren en stroomt over het oppervlak af voordat het de bodem kan binnendringen. Hierdoor kan lokaal erosie ontstaan van de duinhellingen en preferente stroming door de onverzadigde zone. Bij een veranderend klimaat wordt de grondwateraanvulling anders en dit heeft effect op het zoetwatervolume over de langere tijd (KNMI, 2023). In de metingen is een toename van de jaarneerslag zichtbaar van 15-30% met vooral een toename in de kuststrook (Sluijter et al., 2018). In tegenstelling tot het binnenland is er in de kuststrook ook een trend naar meer neerslag in de zomer (Philip et al., 2020). Uit neerslagmetingen bij Castricum blijkt de gemiddelde neerslag te zijn gestegen van 781 mm/jaar over de periode 1931-1960 naar 941 mm/jaar over de periode 1991-2020, een toename van 161 mm/jaar (Cirkel and Aggenbach, 2024). Ook de (Makkink) referentieverdamping neemt toe langs de kust, maar met 10-15% per graad ‘Global Mean Surface temperature’ (GMST) minder

<sup>2</sup> Met dank aan een waardevolle bijdrage van Gijsbert Cirkel van het KWR Water Research Institute.

dan in het binnenland. Hoe de verandering in referentieverdamping en neerslag doorwerkt in de daadwerkelijke verdamping en grondwateraanvulling is sterk afhankelijk van de vegetatie en bodemontwikkeling.

#### 9. Type vegetatie in de duinen<sup>2</sup>

Het type vegetatie in de duinen is van groot belang voor de mate van de grondwateraanvulling, en daarmee op de langere termijn voor het zoetwatervolume. De droge, zandige delen van het duin met weinig vegetatie hebben een grotere grondwateraanvulling dan locaties met bos of struweel. Uit metingen in de lysimeters in Castricum (periode 1957-1981) bleek bijvoorbeeld een grondwateraanvulling van slechts 150 mm/jaar onder zwarte den en maar liefst 642 mm/jaar onder stuifzand (Van der Hoeven, 2011). Dit beeld wordt bevestigd in recent onderzoek waarbij droog natuurlijk grasland en stabiele duinbodems een aanvulling lieten zien van respectievelijk 543 en 626 mm/jaar (Voortman et al., 2015). Naast het type vegetatie is ook de respons van de vegetatie op het weer van belang. Tijdens droge perioden zal de transpiratie van planten reduceren en kunnen ondiep wortelende planten zelfs afsterven waardoor de werkelijke verdamping aanzienlijk lager is dan de door klimaatverandering toenemende referentieverdamping. In combinatie met een gelijkblijvende of zelfs stijgende zomerneerslag kan hierdoor de grondwateraanvulling zelfs toenemen. Bovengenoemde terugkoppelingen zijn door Witte et al. (2008, 2012) voor duingraslanden uitgewerkt met een aantal empirische relaties en het bodemvochtmodel SWAP. Uit deze berekeningen bleek dat de daadwerkelijke aanvulling onder korte duinvegetaties een factor 1.7 hoger kan liggen dan het potentiële neerslagoverschot. Later onderzoek van Voortman et al. (2017) laat zien dat ook bodemvorming en successie een rol speelt waardoor de verdamping over de tijd toeneemt. Deze aspecten zijn gezien de complexiteit nog niet meegenomen in deze studie.

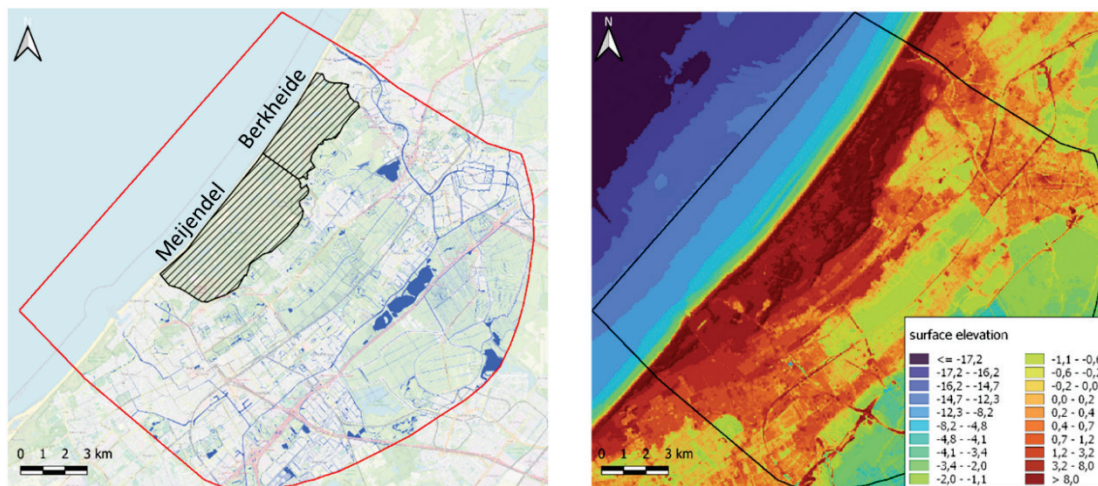
## 1.4 Indeling van het rapport

In Hoofdstuk 2 volgt eerst de beschrijving van het numerieke 3D model dat is gebruikt in de uitgebreide analyse, gevolgd door een beschrijving van de verschillende scenario's, zoals zeespiegelstijging, zandsuppletie en bodemdaling. Hoofdstuk 3 behandelt kort de opzet van de 2D zoet-zout profiel modellen. De resultaten worden respectievelijk besproken in de Hoofdstukken 4 (3D model) en 5 (2D modellen), met de nadruk op de beschrijving van de referentiesituatie, de verschillende scenario's, en de gevoeligheidsanalyses. Het rapport geeft in Hoofdstuk 6 algemene conclusies en aanbevelingen voor toekomstige stappen. Het rapport sluit af met referenties en vijf korte bijlagen.

## 2 Methodiek 3D zoet-zout model

### 2.1 Het Dunea studiegebied

Het gemodelleerde gebied ligt voor de kust van Den Haag en omvat de belangrijkste infiltratielocaties en enkele polders aan de landzijde van het duingebied (Figuur 4). Door drinkwaterleidingbedrijf Dunea wordt de zoete grondwatervoorraad in de duinen gebruikt voor de productie van drinkwater.



Figuur 4: Links: het studiegebied met de belangrijkste waterlopen in blauw (sloten, meren, infiltratiewaterplassen en kanalen) en de randen van het modelgebied in rood. Rechts: maaiveldhoogte samen met de bathymetrie in de Noordzee. De gearceerde gebieden in de kaart links geven de locatie aan van waterinfiltratie en drinkwaterproductie in de duinen, de belangrijkste aandachtsgebieden.

De gearceerde gebieden in Figuur 4 geven de twee gebieden aan (te weten 'Meijndel' en 'Berkheide') waarvoor op basis van de modelresultaten de zoetwatervolumes zijn berekend.

### 2.2 Kenmerken van het 3D model

#### 2.2.1 Gebruikte software IMOD-WQ

Het gebruikte modelinstrument is een bestaand 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel voor grondwaterstroming en gekoppeld zout transport. Het numerieke model is ontwikkeld tijdens een aantal studies voor het drinkwaterleidingbedrijf Dunea rondom het vraagstuk van het vergroten van het overbruggingsvermogen<sup>3</sup> van de strategische zoetwatervoorraad in de duinen (Boonekamp et al., 2021, 2019; Huizer, 2024, 2020), en intern bij Deltares toegepast voor het onderzoek 'Rethink the Delta – Duinen' (IJff et al., 2020).

Het achterliggende softwarepakket is iMOD-WQ (Verkaik et al., 2018), waarin de gangbare code voor zout grondwatertransport SEAWAT (Langevin et al., 2008) is geparallelliseerd. Dit

-----  
<sup>3</sup> Een overbruggingsperiode voor een waterbedrijf is de periode waarin de drinkwatervoorziening kan worden gegarandeerd bij het uitblijven van nieuwe wateraanvoer (bijvoorbeeld in tijden van droogte, calamiteiten of storingen in het aanvoersysteem), door gebruik te maken van strategische reserves, zoals opgeslagen grondwater in zoetwaterlenzen.

betekent dat door opdeling van het modeldomein in meerdere subdomeinen en deze parallel uit te rekenen, de verschillende scenario's veel sneller kunnen worden doorgerekend. iMOD-WQ wordt gebruikt om de scenario's aan te maken, modelberekeningen uit te voeren, en de resultaten te bekijken in een reproduceerbare vorm. De code is ontwikkeld en wordt onderhouden door Deltares en maakt deel uit van een familie van andere open source software van Deltares (zie <https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/imod>). Het maakt modellering van grondwater waterkwantiteit, stoftransport waaronder zouttransport en bodemdaling mogelijk voor verschillende toepassingen. iMOD-WQ en de bijbehorende (python) tools zijn eerder ook gebruikt bij de actualisatie van het landelijk NHI zoet-zout modelinstrumentarium (Delsman et al., 2020) en het COASTAR programma (<https://www.coastar.nl/>; Burgering et al. (2021)).

iMOD-WQ / MODFLOW is in staat om veranderingen in de meeste hydrologische randvoorwaarden, zoals grondwateraanvulling, oppervlaktewaterpeilen en onttrekkingen, eenvoudig te implementeren door middel van stressperiodes. Voor deze studie moeten echter een aantal scenario's worden doorgerekend waarbij dat niet mogelijk is. Dit betreft bijvoorbeeld aanpassingen aan de maaiveldhoogte bij de scenario's voor zandsuppletie en bodemdaling. Hiervoor moet in principe voor elke stressperiode waarin het maaiveld wordt aangepast, een nieuw model worden opgesteld. In zo'n situatie worden meerdere aparte modellen gemaakt en gedraaid, maar het aantal blijft noodzakelijkerwijs beperkt.

Het geavanceerde modelinstrumentarium (software en het gekalibreerde model) lijkt ons desalniettemin voldoende robuust doorontwikkeld om deze kennisvragen voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging te beantwoorden.

### 2.2.2 Ruimtelijke en temporele discretisatie

Het numerieke model is opgedeeld in gridcellen van 50 x 50 m<sup>2</sup>, met in totaal 430 rijen en 464 kolommen. In totaal zijn 49 uniforme modellagen met verschillende diktes geïmplementeerd vanaf +10 m NAP tot een diepte van 250 m onder NAP. De dikte van de modellagen neemt toe met de diepte: de eerste 15 modellagen van bovenaf van 2 m dikte van +10 m NAP tot -20 m NAP, dan 22 modellagen van 5 m dikte van -20 m NAP tot -130 m NAP, en tenslotte 12 modellagen van 10 m dikte van -130 m NAP tot -240 m NAP. Deze verfijnde discretisatie is geïmplementeerd om numerieke dispersie (viz. menging van zoet, brak en zout grondwater) en massabalansfouten te minimaliseren, terwijl het geen bijzondere overbelasting van het geheugen met zich meebrengt die de rekentijd van de modelberekeningen zouden kunnen vertragen.

Uiteindelijk bevat het numerieke model in totaal 9,776,480 elementen. Dankzij de parallelisatiefunctie die in iMOD-WQ is geïmplementeerd (<https://oss.deltares.nl/web/imod>, Deltares, 2022), bedroeg de doorlooptijd van het model slechts 5-7 uur (bij gebruik van 4 cores) voor een berekening van ongeveer 100 jaar, inclusief de nabewerking van de modelresultaten. De post-processing stap omvat het samenvoegen van modelbestanden (van de parallelle runs), de analyse en het plotten van resultaten.

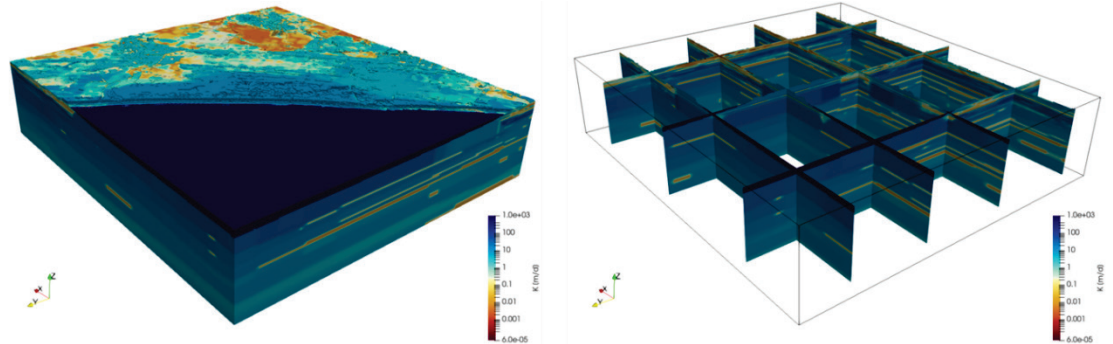
Het niet-stationaire model draait met driemaandelijke stressperiodes (90, 91 of 92 dagen), waardoor seizoensgebonden variaties in bijvoorbeeld grondwateraanvullingen, oppervlaktewaterpeilen, en grondwateronttrekkingen mogelijk zijn. Deze processen zijn belangrijk voor de ontwikkeling van zoetwaterlenzen. De berekende grondwateraanvullingen (paragraaf 2.3.3, pagina 26) zijn overigens op decadebasis, maar zijn met python omgezet naar maandelijke waarden.

### 2.2.3 Geologisch model

Verschillende geologische bronnen zijn gecombineerd om het geologische model van het Dunea gebied en omgeving te ontwikkelen. De heterogene en complexe ondiepe ondergrond

van het duingebied Meijendel-Berkheide is geschematiseerd op basis van het reeds aanwezige Triwaco-Flairs basismodel van Dunea. Dit is gecombineerd met de diepe ondergrond op basis van REGIS II v2.2 (Boonekamp et al., 2019; Huizer, 2020). Lokale informatie op basis van boorgegevens en het digitale geologische model van DINOloket is bovendien gebruikt om gemodelleerde geologische en hydrogeologische eenheden, watervoerende pakketten ('aquifers' in het engels) en slechtdoorlatende lagen ('aquitards' in het engels) te definiëren.

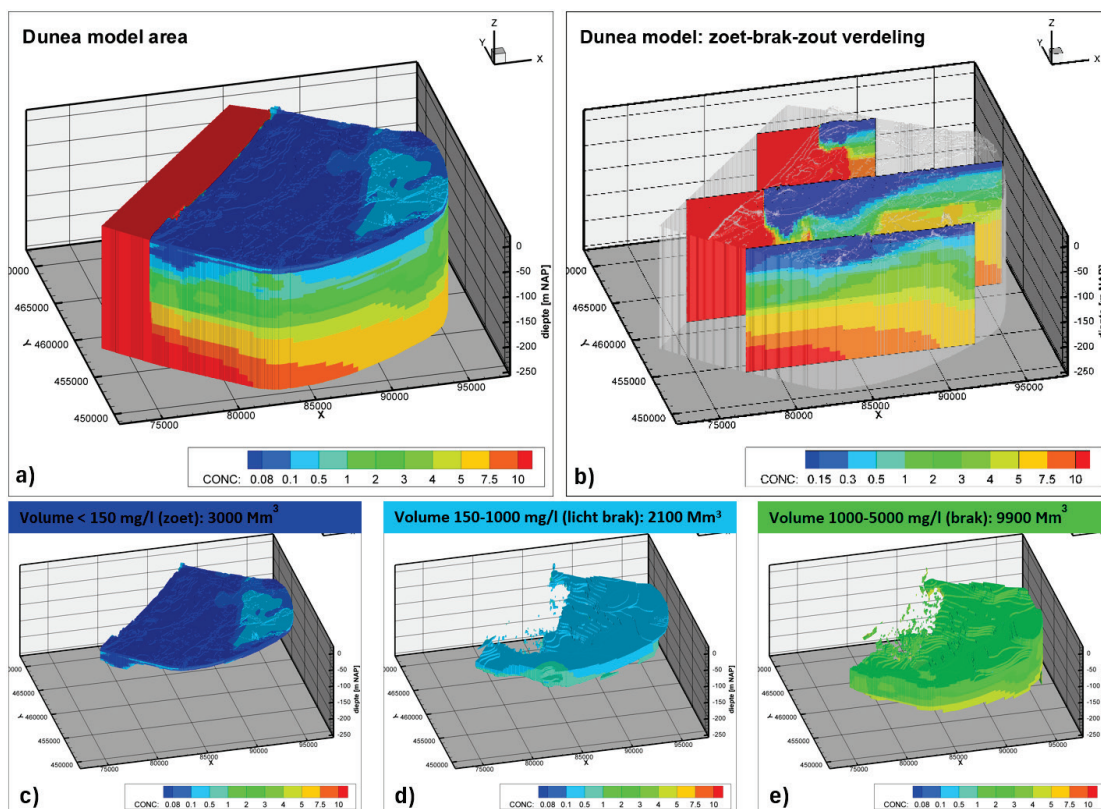
De dieptes van de bovenzijde en de onderzijde van het model, en de dikte van de eenheden zijn beschikbaar in rasterbestanden met een resolutie van 50 x 50 m<sup>2</sup>. Figuur 5 toont het geologisch model met de geïmplementeerde waarden van de doorlatendheid die in de modelberekeningen zijn gebruikt. Zandeenheden hebben gemiddelde doorlatendheidswaarden rond 10 m/d, terwijl klei-eenheden waarden onder 0.001 m/d hebben.



*Figuur 5: Geologisch model van het studiegebied. Blauwe kleuren geven een hogere waarde voor doorlatendheid (K, in m/dag) aan, terwijl rode kleuren lagere waarden aangeven. Het water aan de zeezijde is ook weergegeven in donkerblauw.*

#### 2.2.4 Zoet-brak-zout grondwater verdeling

De initiële zoet-zoutverdeling in het numerieke model is gebaseerd op een 3D-interpolatie door TNO, waarbij beschikbare meetgegevens, zoals elektromagnetische metingen, zijn gebruikt (Figuur 6). De methodiek is kort toegelicht in Bijlage C van Boonekamp et al. (2019). De definitie van zoet grondwater water is gedefinieerd als water met een chlorideconcentratie tot 150 mg Cl<sup>-</sup>/L (0.15 g Cl<sup>-</sup>/L), de drempelwaarde voor drinkwater in Nederland.



Figuur 6: De zoet-brak-zout grondwater verdeling in het gehele model gebied (dus groter dan Dunea gebied alleen): a) volledig modelgebied in 3D, b) enkele doorsneden, c) - e): locaties en volumes in zoet, licht brak en brak grondwater in het modeldomein. In de duinen bevindt het meeste zoete grondwater zich op een diepte van minder dan -100 m NAP.

Het kan lang duren voordat de zoet-brak-zout grondwater verdeling zich heeft aangepast aan een nieuw dynamisch evenwicht dat past bij de heersende randvoorwaarden. Transport van zout in grondwater is een traag proces en het lange termijn geheugen van de zoet-zout grondwater verdeling kan tientallen tot honderden jaren duren. Ondanks inspanningen om een representatieve initiële zoet-zout verdeling te verkrijgen voor de modelberekeningen, moet rekening worden gehouden met het lange termijn geheugen bij het bepalen van initiële zoet-brak-zout verdelingen en het effect daarop op projecties (o.a. De Louw et al., 2019). Er wordt aangenomen dat autonome verzilting (d.w.z. voortdurende verzilting van de ondergrond door bijvoorbeeld lokale menselijke activiteiten in de afgelopen eeuw) zal optreden in de modelberekeningen. Een autonoom verziltingsproces is ook terug te zien in eerdere berekeningen van de regio (Provincie Zuid-Holland: Oude Essink et al., 2010). Dit autonome effect kan in modelberekeningen worden losgekoppeld van de andere processen.

## 2.2.5 Hydrologische voorwaarden

Het bestaande Dunea model is gebaseerd op hydrogeologische data uit het reeds aanwezige Triwaco-Flairs basismodel. Vervolgens is het model binnen de samenwerking van Arcadis met Deltares vergroot en verbeterd binnen een aantal vervolgprojecten voor Dunea (Boonekamp et al., 2021, 2019; Huizer, 2024, 2020). Hieronder volgt een korte beschrijving van de randvoorwaarden die zijn toegepast in het numerieke 3D model:

- Aan de kust wordt een algemene randvoorwaarde ingesteld, gelijk aan het gemiddelde zeeniveau (0 m NAP)<sup>4</sup>. Deze waarde wordt in de modelberekeningen geleidelijk aangepast om de zeespiegelstijging (met verschillende snelheden) weer te geven. In de modelcellen die de zee voorstellen, wordt bovendien een constante chlorideconcentratie van 16 g Cl<sup>-</sup>/L opgelegd, die de gemiddelde chlorideconcentratie van het Noordzeewater langs de kust weergeeft (Stuyfzand, 1993). Deze waarde is lager dan oceaanwater (~19 g Cl<sup>-</sup>/L) wegens mening met zoet rivierwater).
- Drains die aanwezig zijn in de meeste landbouwpercelen worden in het model geïmplementeerd op basis van diepteligging vanaf het maaiveld. Deze drains zorgen ervoor dat water het model verlaat als de stijghoogte boven de onderzijde van de drain komt. Geschatte dieptewaarden en drainage weerstand zijn voor het Dunea gebied zelf overgenomen uit het reeds aanwezige Triwaco-Flairs basismodel en komen voor de overige gebieden uit de NHI geodataportal (<https://data.nhi.nu>).
- Waterlopen (sloten, boezems, kanalen) en plassen (meren) worden weergegeven met het MODFLOW river-pakket op de bovenste actieve modellagen waardoor water kan infiltreren in en uitreden uit de ondergrond op basis van verschillen tussen grondwaterstijghoogten en de oppervlaktewaterpeilen ter plaatse. Waarden voor de ligging, het type, de hoogte van de rivierbodem en de weerstand tussen oppervlaktewater en grondwater zijn deels overgenomen uit het Triwaco-Flairs basismodel en voor het buitengebied gebaseerd op leggerdata van het Hoogheemraadschap van Delfland, en conform de modelleringsprocedure van o.a. LHM zoet-zout (Delsman et al., 2020).
- Een grondwateraanvulling die ruimtelijk en temporeel varieert is opgelegd aan de bovenkant van het modeldomein (zie Bijlage 8A.1, pagina 61 voor een aantal ruimtelijke voorbeelden) (Huizer, 2020). Hiervoor zijn berekende grondwateraanvullingen uit MetaSwap overgenomen uit het Landelijk Hydrologisch Model, versie 3.4, en gecombineerd met KNMI'23-klimaatscenario's (KNMI, 2023). MetaSWAP vertaalt de complexe interacties tussen factoren zoals neerslag, verdamping, bodemvocht, de onverzadigde zone, infiltratie en capillaire opstijging vanuit het grondwater, en de invloed van vegetatie naar een schatting van de grondwateraanvulling. Het past niet binnen deze opdracht nieuwe MetaSwap-berekeningen uit te voeren waarbij de variabele parameters van de KNMI'23-klimaatscenario's invoer zijn. Gemiddeld bedraagt de grondwateraanvulling 182 mm/jaar in het hele modeldomein (dus inclusief achterliggende polders), terwijl lokaal in de duingebieden waarden tot 500 mm/jaar worden berekend. In paragraaf 1.3 (pagina 10) bij de factoren 'Veranderend patroon in neerslag en verdamping' en 'Type vegetatie in de duinen' is aangegeven dat in het duingebied lokaal de grondwateraanvulling sterk kan variëren. Het model rekent echter met gemiddelde waarden per gridcel met een oppervlakte van één hectare over een langere periode, waarbij gedetailleerde gegevens over type vegetatie, en neerslag- en verdampingspatronen in het duingebied niet beschikbaar zijn. Om deze onzekerheid in beperkte mate inzichtelijk te maken is in paragrafen 2.3.2 (pagina 24) en 4.5 (pagina 40) het effect van verschillende grondwateraanvulling scenario's enigszins zichtbaar gemaakt. Momenteel zijn de berekende grondwateraanvullingen uit MetaSwap alleen beschikbaar tot 2080 voor de verschillende klimaatscenario's. Om modelberekeningen voor na het jaar 2080 uit te voeren, zoals in deze opdracht is gevraagd, zijn de gemiddelde maandelijkse MetaSwap resultaten tussen 2050-2080 genomen en vervolgens gecombineerd met KNMI'23-klimaatscenario's. Dit houdt bijvoorbeeld in dat de laatste 20 jaar van de

-----  
<sup>4</sup> In deze studie naar de effecten van een zeespiegelstijging in het grondwatersysteem is het modelleren van een jaargemiddelde waarde van het zeeniveau adequaat, ook al blijkt uit onderzoek dat een ietwat hogere waarde door getijwerking op een grondwatersysteem met een hellend vlak als bovenrandvoorwaarde representatiever is (Vandenbohede and Lebbe, 2006).

modelberekeningen voor zichtjaar 2100 een herkenbaar patroon van grondwateraanvulling laten zien alhoewel de absolute waarde verschilt. Het water dat infiltreert heeft een chlorideconcentratie gelijk aan 0 g Cl<sup>-</sup>/L, hetgeen zoet regenwater voorstelt (in werkelijkheid is voor regen in de kuststrook de chlorideconcentratie iets hoger door zogenaamde seaspray (Stuyfzand, 1993)).

- Winputten uit het duingebied van Dunea zijn in het model opgenomen met het MODFLOW well-pakket voor grondwateronttrekkingen (Harbaugh, 2006). Onttrekkingsdata zijn overgenomen uit het Triwaco-Flairs basismodel (Boonekamp et al., 2019). De gemodelleerde onttrekkingen in het model variëren driemaandelijks.
- Aan de onderkant van het model bevindt zich een ondoorlatende basis waarover geen grondwaterstroming plaatsvindt. De zijkanten van het modeldomein hebben een constante stijghoogten tijdens de gehele modelberekening op basis van een gemiddelde waarde over de tijdsperiode 1980-2020. Deze stijghoogten zijn gecorrigeerd voor dichtheidseffecten (Santing, 1980).
- Om een teveel aan regenwater (bijv. na intense regenval) via het maaiveld of oppervlakkige greppels af te voeren, zijn aan de bovenkant van het modeldomein een zogenaamde (kunstmatige) overland flow drains geïmplementeerd. Feitelijk zijn dit drains met een lage weerstand die ervoor zorgen dat overtollig regenwater het systeem kan verlaten zodra de stijghoogte iets boven het landoppervlak komt te liggen. De mate waarin deze zogenaamde 'overland flow'-optie actief is, geeft aan hoe gevoelig het model is, met name nabij hoge freatische grondwaterstanden en vooral in de buurt van het poldergebied aan de oostkant van de duinen.

## 2.3 Uitleg ontwikkelde scenario's

Om de individuele effecten van verschillende processen en parameters (bijv. grondwateraanvulling, zeeniveau, geologie) op de ontwikkeling van de lokale zoetwaterlens te beoordelen, zijn de volgende scenario's ontwikkeld (zie Tabel 3). Er zijn zeven categorieën te onderscheiden, waarvan de focus ligt op de eerste vijf:

1. Zeespiegelstijging
2. Zandsuppletie in het actieve kustprofiel, tussen -8 m NAP en eerste duintop
3. Grondwateraanvulling naar aanleiding van klimaatverandering
4. Bodemdaling
5. Een combinatie van voorgaande categorieën

En bovendien:

6. Autonoom (modelberekening zonder veranderingen van het zeeniveau om de autonome variaties van de zoetwaterlens te beoordelen, onafhankelijk van de bovengenoemde processen)
7. Geologie (modelberekeningen uitgevoerd met gewijzigde waarden voor de doorlatendheid om de gevoeligheid van de modelresultaten voor veranderingen in de parameters te beoordelen)

Na de tabel volgt een uitleg over elk scenario.

Tabel 3: Korte beschrijving van de modellen met bijbehorende scenario's. SLR = zeespiegelstijging; SS = zandsuppletie, subs = bodemdaling.

Naam scenario	Gesimuleerde periode	Korte beschrijving
<b>referentiesituatie</b>	1980-2018	Opwarmperiode van het model; genereren van de beginvoorwaarde van o.a. de zoet-zout verdeling ten behoeve van modelberekeningen van toekomstige scenario's. Geen veranderingen van het zeeniveau en geen veranderingen in de grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling daarvan.
<b>no_SLR</b>	2030-2100	Autonoom scenario, tot en met 2100: beoordeling van onafhankelijke veranderingen in zoetwatervolume en zoetwaterlens als gevolg van onstabieleit van het systeem. Geen veranderingen van het zeeniveau en geen veranderingen in de grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling daarvan.
<b>0.5m SLR</b>	2030-2100	0.5 m zeespiegelstijging tegen 2100. Geen veranderingen in de grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling.
<b>1.0m SLR</b>	2030-2100	1.0 m zeespiegelstijging tegen 2100. Geen veranderingen in grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling ervan.
<b>3.0m SLR</b>	2030-2150	3.0 m zeespiegelstijging tegen 2150. Geen veranderingen in grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling ervan.
<b>no_SLR + SS</b>	2030-2100	0.5 m extra hoogte in het actieve kustprofiel (zandsuppletie) om alleen de effecten van zandsuppletie te beoordelen. Geen verandering van het zeeniveau en geen veranderingen in de grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling ervan.
<b>0.5m SLR + SS</b>	2030-2100	0.5 m extra hoogte in het actieve kustprofiel (zandsuppletie) volgens jaarlijkse zeespiegelstijging percentages om het gevolg van zandsuppleties ten opzichte van zeespiegelstijging te beoordelen. Geen veranderingen in grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling ervan.
<b>1.0m SLR + SS</b>	2030-2100	1.0 m extra hoogte in het actieve kustprofiel (zandsuppletie) volgens jaarlijkse zeespiegelstijging percentages om het gevolg van zandsuppleties ten opzichte van zeespiegelstijging te beoordelen. Geen veranderingen in grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling ervan.
<b>no_SLR + sub.</b>	2030-2100	0.4 m bodemdaling in de poldergebieden, gesimuleerd door een dalende bodem en dalende waterpeilen van het oppervlakwatersysteem (greppels, sloten, kanalen, meren) en dalende drainagebuizen.

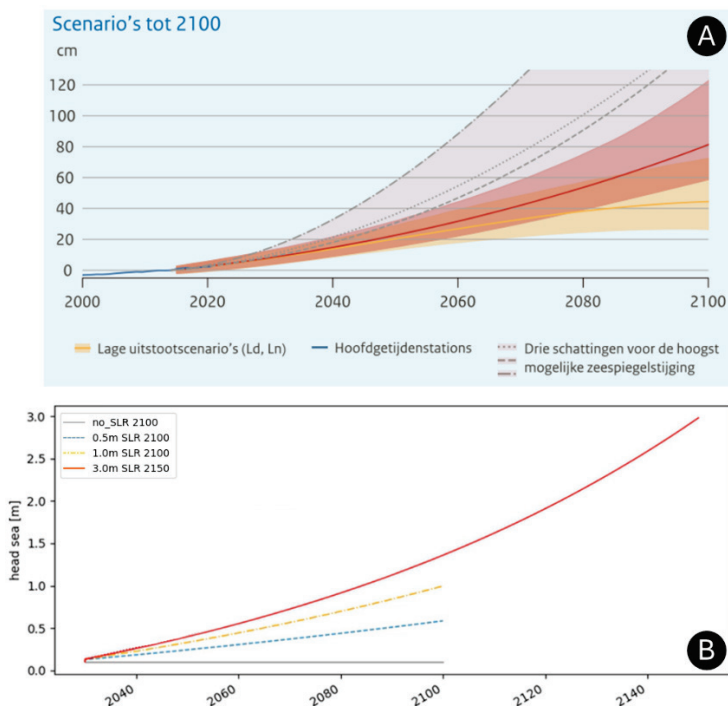
		Geen veranderingen van het zeeniveau en geen veranderingen in de grondwateraanvulling en de ruimtelijke verdeling ervan.
<b>GWR -3%</b>	2030-2100	Afname in de grondwateraanvulling berekend door MetaSwap om veranderingen van afnemende grondwateraanvulling te simuleren en te beoordelen (gebaseerd op neerslagtrends van de KNMI'23-klimaatscenario - Hd). Geen veranderingen van het zeeniveau.
<b>GWR +3%</b>	2030-2100	Toename in de grondwateraanvulling berekend door MetaSwap om veranderingen van toenemende grondwateraanvulling te simuleren en te beoordelen (gebaseerd op neerslagtrends van de KNMI'23-klimaatscenario - Ln). Geen veranderingen van het zeeniveau.
<b>GWR +8%</b>	2030-2100	Toename in de grondwateraanvulling berekend door MetaSwap om veranderingen van toenemende grondwateraanvulling te simuleren en te beoordelen (gebaseerd op verzoek van KWR om het effect van een toenemende grondwateraanvulling te simuleren, vergelijkbaar met het KNMI'23-klimaatscenario - Hn). Geen veranderingen van het zeeniveau.
<b>combi scen 01</b> <b>0.5m SLR + subs</b> <b>+ GWR -3%</b>	2030-2100	Gecombineerd scenario 1 met voornamelijk verwachte veranderingen tegen 2100: 0.5 m zeespiegelstijging; 0.4 m bodemdaling in de poldergebieden; afname van de grondwateraanvulling.
<b>combi scen 02</b> <b>0.5m SLR + subs</b> <b>+ GWR +3%</b>	2030-2100	Gecombineerd scenario 2 met voornamelijk verwachte veranderingen tegen 2100: 0.5 m zeespiegelstijging; 0.4 m bodemdaling in de poldergebieden; toename van de grondwateraanvulling.
<b>no_SLR + 0.5_K</b>	2030-2100	De waarden voor de doorlatendheid worden met 50% verlaagd om de gevoeligheid van de resultaten voor verschillende geologische waarden te beoordelen. Geen veranderingen van het zeeniveau.
<b>no_SLR + 2.0_K</b>	2030-2100	De waarden voor de doorlatendheid zijn verhoogd met 100% om de gevoeligheid van de resultaten voor verschillende geologische waarden te beoordelen. Geen veranderingen van het zeeniveau.

### 2.3.1 Zeespiegelstijging scenario's

De scenario's voor zeespiegelstijging zijn gebaseerd op de berekeningen van het KNMI'23-klimaatscenario's (KNMI, 2023). Behalve het scenario zonder zeespiegelstijging zijn in totaal drie zeespiegelstijging scenario's beschouwd:

- 0.5 m boven het huidige zeeniveau in 2100,
- 1.0 m boven het huidige zeeniveau in 2100, en
- 3.0 m boven het huidige zeeniveau in 2150

Figuur 7 hieronder laat zien hoe zeespiegelveranderingen zich in de tijd voordoen binnen elke berekening en elk scenario.



Figuur 7: a) KNMI'23-klimaatscenario's voor zeespiegelstijging in Nederland; b) scenario's van geïmplementeerde zeespiegelveranderingen over de tijd van nu tot 2100 (of 2150). Voor het extreme geval van 3.0 m zeespiegelstijging (rode lijn) wordt aangenomen dat een snellere stijging optreedt tegen het einde van de eeuw als gevolg van de positieve terugkoppeling van het smelten van gletsjers en Antarctica die de zeespiegelstijging versnelt.

### 2.3.2 Zandsuppletie scenario

Voor de ontwikkeling van het zandsuppletie scenario heeft Rijkswaterstaat topografische gegevens verstrekt over hoe het kustfundament en de duinstrook de afgelopen jaren zijn onderhouden en/of opgehoogd. Deze topografische profielen zijn gebaseerd op de JARKUS-raaien (JAaRjaarlijkse KUST-metingen). Deze kustprofielen worden loodrecht op de kustlijn gemeten en liggen 250 m uit elkaar. Over het algemeen bestrijken deze profielen van -8 tot +15 m NAP en een paar honderd meter landinwaarts vanaf het eerste duin.

Met de voor dit studiegebied geselecteerde JARKUS-raaien wordt een nieuw digitaal hoogtemodel gecreëerd. De oude maaiveldhoogte wordt vervangen door de nieuwe topografie, hetgeen belangrijk is bij het bepalen van de verwachte duinhoogte en de beperkte zeewaartse uitbreiding van het kustfundament. Het instrumentarium berekent vervolgens nieuwe invoergegevens voor het grondwatermodel.

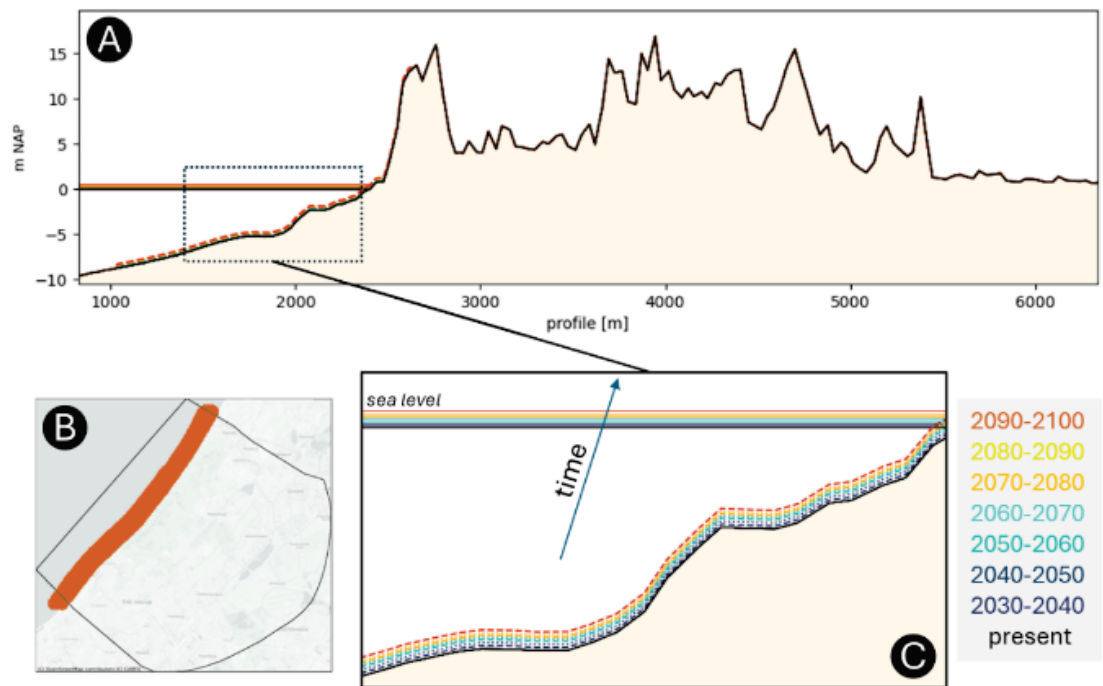
Omdat de topografie tijdens een berekening van het grondwatermodel de topografie niet kan worden gewijzigd, zijn de zandsuppleties gesimuleerd in 10 stappen (d.w.z. opeenvolgende deelmodellen van elk 10 jaar), waarbij in elke stap de topografie van het model specifiek in het

kustgebied is bijgewerkt door middel van extra zandsuppleties. De topografie en de uitvoer van het basismodel zijn gebruikt als initiële voorwaarden voor de eerste run. De daaropvolgende modelberekeningen werden in serie uitgevoerd, waarbij de outputs van de ene run werden gebruikt als initiële voorwaarden voor de volgende.

Figuur 8 toont het gebied waar zandsuppleties plaatsvinden, en een dwarsdoorsnede met een voorbeeld van hoe veranderingen in zeeniveau en topografie worden geïmplementeerd in elke simulatietijdstep voor het scenario van 0.5 m zeespiegelstijging. Voor het scenario van 1.0 m zeespiegelstijging en de bijbehorende zandsuppletie van 1.0 m wordt een vergelijkbare aanpak gevolgd.

De nieuwe topografie heeft effect op de mate van afstroming van regenwater voordat het grondwatersysteem wordt bereikt, via onder andere het concept van 'overland flow' en eventueel gewone drainage (al komt dat nauwelijks voor in het duingebied). Figuur 2 in paragraaf 1.3 (pagina 10), laat zien dat dit de vorm van de lens beïnvloedt: zandsuppletie kan een grotere grondwateraanvulling van zoet water betekenen, wat leidt tot minder afstroming en dus een grotere zoetwaterlens.

De mate van stijging van het maaiveld is als volgt: de verhoging van land volgt de snelheid van de zeespiegelstijging. Aan het einde van elke simulatietijdstep wordt plaatselijk het land met dezelfde hoeveelheid verhoogd als de zeespiegelstijging in die stap. Als de zeespiegel tussen 2030-2040 bijvoorbeeld 0.1 m stijgt, worden de suppleties met dezelfde snelheid gesimuleerd en wordt er 0.1 m zand aan het morfologisch actieve deel van de kust toegevoegd; dit wordt opgelegd aan het begin van de simulatieperiode (Figuur 8). Voor het 'nieuwe zand' dat in het model werd toegevoegd, worden dezelfde ondergrondse eigenschappen van de zandduinen geïmplementeerd (doorlatendheid, porositeit).



Figuur 8: a) Dwarsdoorsnede van de kust van het studiegebied met de verschillende topografieën (d.w.z. de modeltop). b) het gebied waar de zandsuppleties zijn geïmplementeerd is oranje gekleurd. c. de verschillende topografieën zoals ze zijn geïmplementeerd in elke simulatietijdstep. Elke gekleurde lijn geeft het zeeniveau en de topografie van een deelmodel voor dat specifieke tijdsinterval aan.

### 2.3.3 Grondwateraanvulling scenario's

Er zijn modelberekeningen uitgevoerd om de effecten van toenemende en afnemende grondwateraanvulling in het duingebied te beoordelen. Om de grondwateraanvulling te bepalen, wordt voor deze opdracht gebruikgemaakt van MetaSWAP-berekeningen uit het Landelijk Hydrologisch Model (versie 3.4), gecombineerd met de lineaire trends van drie scenario's: -3% (Hd van KNMI'23), +3% (Ln van KNMI'23) en +8% (Hn van KNMI'23). Deze scenario's volgen uit de KNMI'23-klimaatscenario's voor neerslag (KNMI, 2023).

Het past binnen de scope van deze opdracht om deze benadering te hanteren, aangezien het uitvoeren van uitgebreide MetaSWAP-berekeningen met de veranderende waarden uit de KNMI'23-klimaatscenario's (zoals neerslag, vochtigheid en de potentiële verdamping volgens de methode Makkink) niet haalbaar is. Het laatste scenario van +8% is extra toegevoegd ten opzichte van de originele uitvraag omdat uit onderzoek van het KWR Water Research Institute blijkt dat veranderingen in neerslag en verdamping in het duingebied aanzienlijk kunnen afwijken van de gemiddelde Nederlandse situatie. Zie in paragraaf 1.3 de factoren 'Veranderend patroon in neerslag en verdamping' (pagina 14) en 'Type vegetatie in de duinen' (pagina 15). De extra modelberekening van +8% (Hn van KNMI'23) laat de effecten zien van nattere omstandigheden langs de kust.

Enige terughoudendheid bij deze waarden is gewenst. Omdat MetaSwap-berekeningen niet beschikbaar zijn voor alle KNMI'23-klimaatscenario's over de gehele simulatieperiode, dient deze aanpak als een benadering voor het beoordelen van het effect van de veranderingen in grondwateraanvulling. Voor nauwkeurigere representatieve resultaten moeten nieuwe MetaSwap-berekeningen worden uitgevoerd.

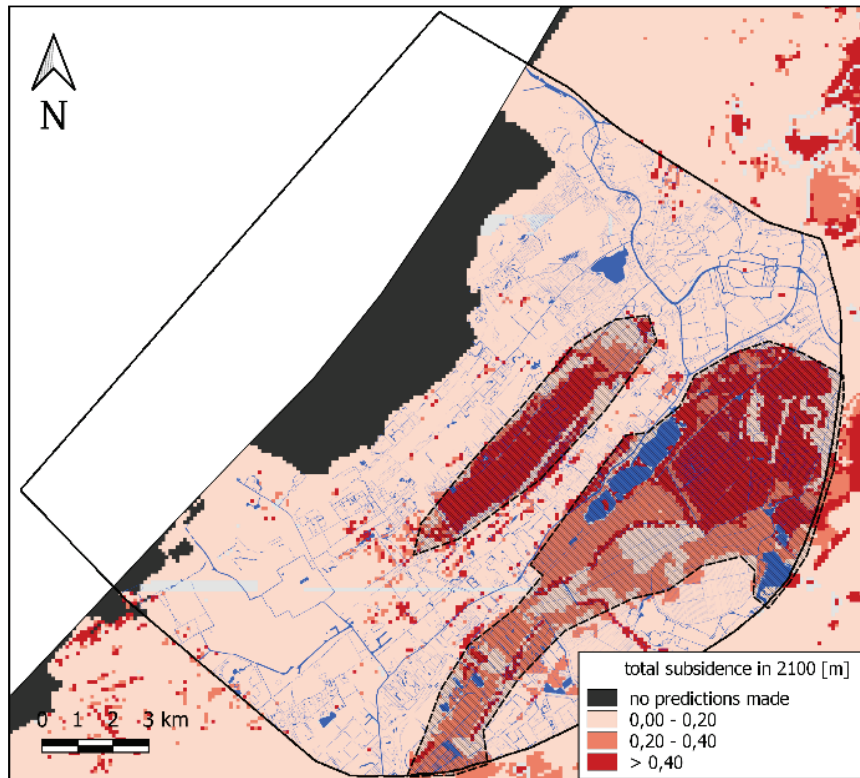
In Bijlage 8A.1, pagina 61 zijn kaarten toegevoegd die de seizoens- en ruimtelijke variatie van grondwateraanvulling over een twaalf maanden laten zien, evenals de ruimtelijke verdeling van de totale jaarlijkse grondwateraanvulling.

### 2.3.4 Bodemdaling scenario's

Er zijn drie bodemdaling scenario's doorgerekend. In één daarvan is alleen het effect van bodemdaling op het autonome verziltingsproces bekeken (zie scenario 'no\_SLR + sub.' in Tabel 3). Twee andere bodemdaling scenario's worden gecombineerd met meerdere categorieën, en worden kort in de volgende paragraaf beschreven.

Voor deze scenario's zijn de bodemdalingssnelheden (tot ongeveer 0.4 m) uit de *Klimaat-effectatlas* overgenomen (scenario hoog – peilindexatie en sterke klimaatverandering). Deze significante bodemdaling vindt plaats in met name de gearceerde gebieden en rondom de polders aan de oostkant van het modeldomein (Figuur 9).

In de modelberekeningen zijn de drainageniveaus, het maaiveld (voor 'overland flow') en het waterpeil van het oppervlaktewatersysteem ter plaatse van de bodemdalingengebieden aangepast over drie grote perioden: 2030-2050, 2050-2070 en 2070-2100. Omdat in het gebruikte modelinstrumentarium de maaiveldhoogte en aanpalende drainageniveaus niet per stressperiode kunnen worden aangepast, moest telkens een nieuw model met invoergegevens uit de vorige periode worden opgestart (zie ook paragraaf 2.3.4). Dit vergde veel inspanning, en in samenspraak met de opdrachtgever is bepaald dat drie stressperiodes afdoende waren.



*Figuur 9: Totale bodemdaling die naar verwachting zal optreden in het studiegebied tot 2100. De gearceerde gebieden geven aan waar rivierbodems en afwateringshoogten in drie grote periodes zijn gewijzigd om een bodemdaling te simuleren.*

### 2.3.5

#### **Gecombineerde scenario's**

Tenslotte zijn er gecombineerde scenario's doorerekend waarin, naast de zeespiegelstijging, ook het bodemdalingsproces voor het poldergebied is meegenomen (paragraaf 2.3.4, pagina 26). Daarnaast is in deze scenario's de grondwateraanvulling aangepast, namelijk voor de +3% en -3% KNMI'23-klimaatscenario's. Hiermee worden de meest waarschijnlijke veranderingen die in 2100 in het gebied zullen plaatsvinden samengebracht: zeespiegelstijging, bodemdaling en een verandering in grondwateraanvulling.

### 3 Methodiek 2D zoet-zout profiel modellen

Om het effect van zeespiegelstijging op de verdeling van zoet, brak en zout grondwater langs de Nederlandse kust in te schatten, zijn in totaal negen conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen langs de Nederlandse kustlijn opgesteld; zeven modellen van Hoek van Holland tot Den Helder en twee modellen op de eilanden in het Waddengebied (Figuur 11). Hiervoor is dezelfde code gebruikt als in de verkennende studie van Haasnoot et al. (2018): MOCSENS3D (zie ook Faneca Sánchez et al., 2012; Oude Essink et al., 2010). De code kan eenvoudig niet-stationair, dichtheidsafhankelijk grondwaterstroming en gekoppeld zout transport door te rekenen, en is een voorloper van (en vergelijkbaar met) de huidige standaardcode SEAWAT (o.a. Bakker et al., 2004). De keuze voor deze profielen is gebaseerd op een combinatie van factoren.

Allereerst kunnen de zeven 2D zoet-zout profiel modellen van de verkennende studie van Haasnoot et al. (2018) met een relatief beperkte inspanning worden aangepast voor de zeespiegelstijging scenario's in deze analyse. Hiermee vormen deze modellen een solide basis voor verdere analyses. De grotere zoetwaterlenzen in Noord- en Zuid-Holland zijn van strategisch belang vanwege hun bijdrage aan de drinkwatervoorziening voor miljoenen inwoners. De keuze voor een goede locatie van een analyse met behulp van 2D profielen is beperkt: de grondwaterstroming moet loodrecht op de kustlijn plaatsvinden, en in principe gedurende de gehele simulatie. Dit is niet altijd het geval, zoals bij kleinere grondwatersystemen zoals in Haamstede (Schouwen-Duiveland, Zeeland) waar de grondwaterstroming eerder axiaal symmetrisch afstroomt.

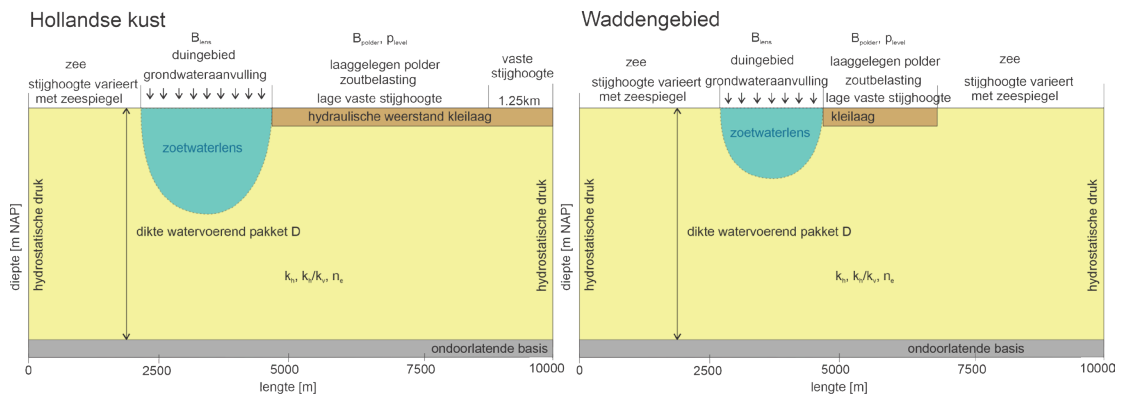
Om daarnaast ook een schatting te maken voor de zoetwaterlenzen op de eilanden in het Waddengebied, zijn twee conceptuele modellen voor Terschelling en Ameland toegevoegd. De regio Zeeland is in deze studie niet geselecteerd, aangezien deze regio reeds in eerdere 3D modelstudies is onderzocht (Van Baaren et al., 2016b).

De karakteristieken van de 2D zoet-zout modellen zijn hieronder kort beschreven, zie ook Figuur 10. De lengte van het profiel is 10 km en de dikte van het grondwater systeem tot de ondoorlatende basis varieert van 45 m tot 200 m (Tabel 4). Per profiel verschillen meerdere parameters: de breedte waarover zoet regenwater in het desbetreffende duingebied kan infiltreren, de dikte van het grondwater systeem, en het polderpeil in de achterliggende gebied.

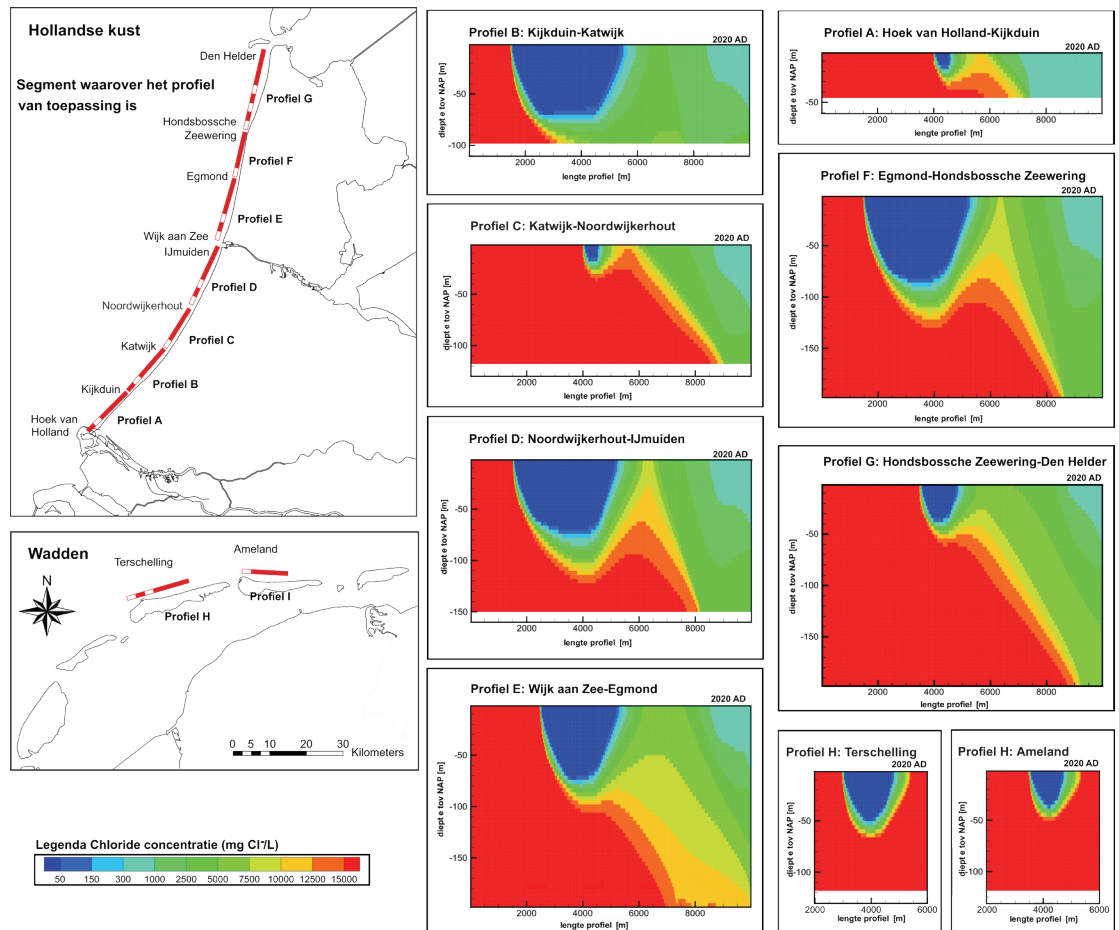
De hydrogeologische waarden die per segment zijn genomen zijn gemiddelde waarden, gebaseerd op eerder onderzoek en op databanken van TNO (o.a. DinoLoket). De grondwateraanvulling van de basis berekeningen is 0.8 mm/dag. Dit is een lagere waarde dan gebruikt in Haasnoot et al. (2018), maar hoger dan de gemiddelde waarde die gebruikt is het 3D model. Tevens is een lagere aanvulling van 0.6 mm/dag doorgerekend om inzicht te krijgen in het effect hiervan. Het zandpakket heeft een doorlatendheid van 10 m/dag en het kleipakket bij de polder een (hoge) hydraulische weerstand van 3200 dagen (anisotropie horizontale en verticale doorlatendheid is 4). Zouttransport vindt plaats met een effectieve porositeit van 30%, een longitudinale dispersiviteit  $\alpha_L$  van 1.0 m (de transversale dispersiviteiten  $\alpha_{TH}=\alpha_{TV}$  zijn 1/10 van  $\alpha_L$ ) en de moleculaire diffusie is  $8.64 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/dag. De model discretisatie is 400 kolommen van 25 m breed, en de dikte van een cel is 4 m. Voor numerieke parameters zoals rekentijdstappen en convergentiecriteria zijn standaard waarden gekozen die passen bij dit soort berekeningen. Er heerst een hydrostatische drukverdeling op beide verticale randen. De natuurlijke grondwater aanvulling in het hoger gelegen duingebied is gelijk aan 0.8 mm/dag. Ten oosten van de duinen zijn twee polderpeilvakken opgegeven, waarvan het eerste in de

laaggelegen polder varieert per profiel (zie Tabel 4 voor de waarde per segment). De gemiddelde polderpeilen worden per modelcel in de bovenste laag ingevoerd.

In het gedeelte van de zee wordt een zeespiegelstijging opgelegd die jaarlijks een fractie toeneemt tot 3.0 m in 2150. Deze waarde komt overeen met de vorm die eerder is besproken, zie Figuur 7b, pagina 24.



**Figuur 10:** Schematisaties van het conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen: a. dwarsdoorsnede langs de Hollandse kust, b. dwarsdoorsnede over een Waddeneiland. De focus ligt op de vorm van de zoetwaterlens en de verandering daarin onder invloed van een zeespiegelstijging. Zie Tabel 4 voor karakteristieken betreffende breedte duingebied, dikte grondwatersysteem en polderpeil in het achterland.



**Figuur 11:** Schematisering van negen dwarsdoorsneden langs de Hollandse kust en op eilanden in het Waddengebied (links onderin de locatie), inclusief initiële chlorideconcentratie.

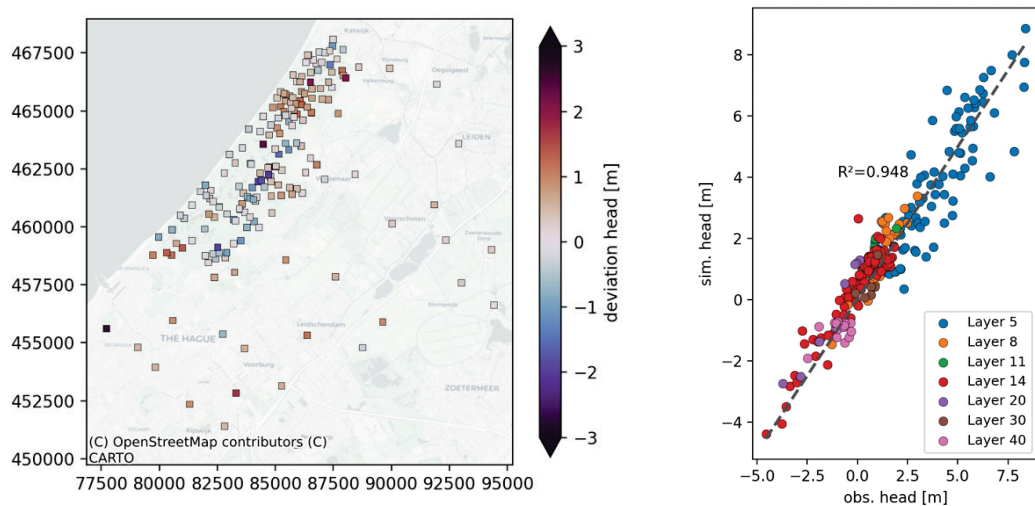
Tabel 4: Kengetallen van de negen conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen. De grove schatting van het huidige zoetwatervolume per segment is het zoetwatervolume (tot 0.3 mg Cl/L) per strekkende meter vermenigvuldigd met de lengte van het segment en de effectieve porositeit.

Segment langs de Nederlandse kust	Lengte profiel langs kust (km)	Dikte watervoerend pakket (m)	Breedte lens (m)	Gemiddelde polderpeilen binnenland (m -NAP)	Grove schatting initiële zoetwatervolume (miljoen m <sup>3</sup> )
A. Hoek van Holland-Kijkduin	15.0	48	500	-1.0	35
B. Kijkduin-Katwijk	15.0	100	3000	-3.0	1070
C. Katwijk-Noordwijkerhout	12.5	120	500	-1.0	30
D. Noordwijkerhout-IJmuiden	17.5	152	3000	-5.0	1150
E. Wijk aan Zee-Egmond	17.5	200	2000	-1.0	810
F. Egmond-Hondsbosche Zeewering	12.5	200	3000	-4.0	946
G. Hondsbosche Zeewering-Den Helder	22.5	200	1000	-1.0	250
H. Terschelling	17.5	120	1500	-1.0	350
I. Ameland	12.5	120	1000	-0.5	115

# 4 Resultaten van het 3D zoet-zout model

## 4.1 Model van de referentiesituatie

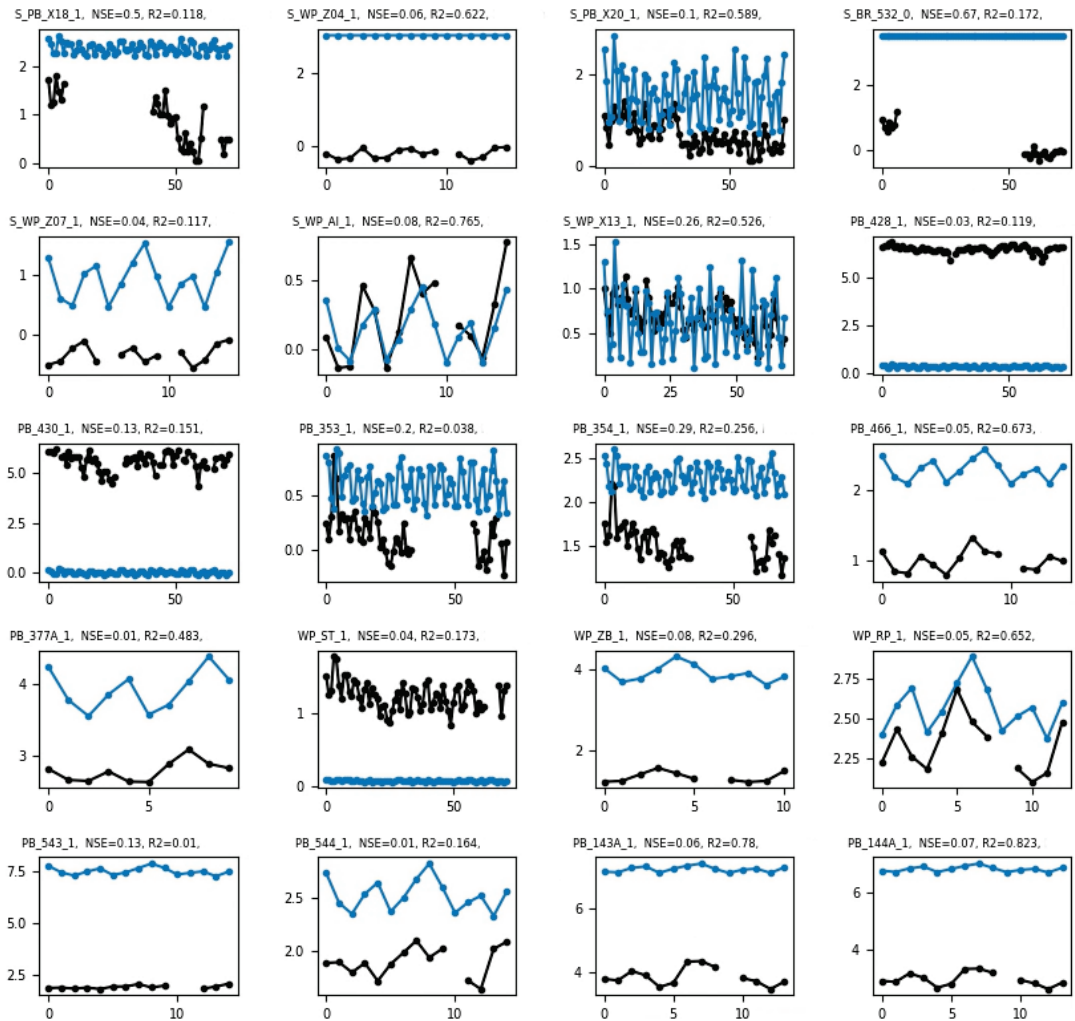
De referentiesituatie omvat modelberekeningen over de periode 1980-2018, bedoeld om de prestaties van het model te controleren en beginvoorwaarden te creëren voor de initiële stijghoogte en chlorideconcentratie voor verdere berekeningen. De stijghoogten van verschillende observatieputten zijn gebruikt om de modelresultaten te beoordelen. Figuur 12 toont de vergelijking tussen de waargenomen en gesimuleerde stijghoogten.



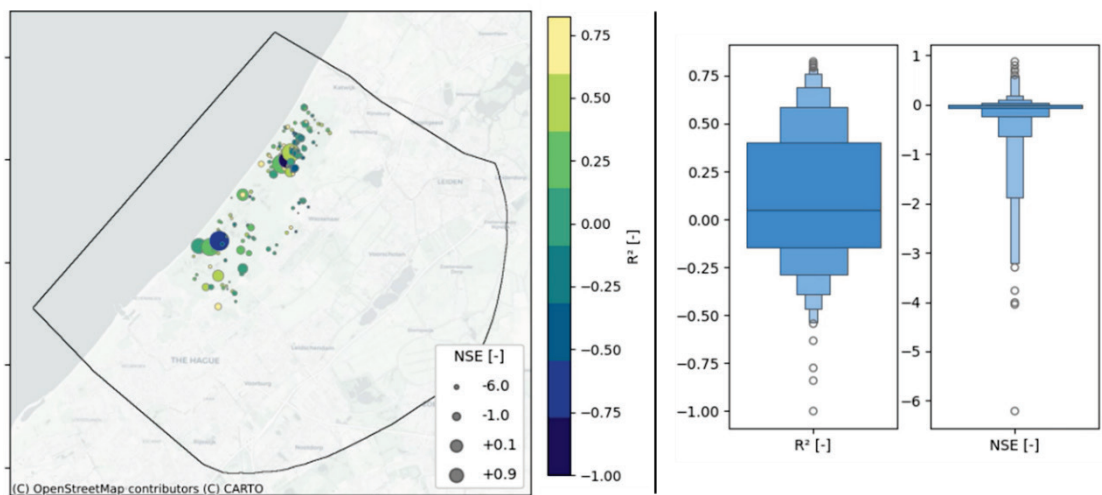
Figuur 12: Links: waargenomen en gesimuleerde stijghoogten voor de referentiesituatie. De grootste afwijkingen worden in de kaart weergegeven met donkerder kleuren. Rechts: de scatterplot toont de waargenomen en gesimuleerde waarden gekleurd volgens de locatie van de modellaag.

De gemiddelde absolute afwijking tussen de waargenomen en gesimuleerde (gemiddelde) stijghoogten bedraagt 0.59 m. Een  $R^2$  van 0.94 en een RMSE van 0,766 m duiden op een redelijk goede overeenkomst tussen de waargenomen en gesimuleerde waarden. De grootste afwijkingen (tot 3 m op één locatie) worden gevonden in het ondiepe grondwatersysteem (modellaag 5, zie Figuur 12 rechts). Hier zijn de lokale processen, die gelieerd zijn aan veranderende neerslag- en verdampingspatronen en de vegetatie in de duinen, het meest dominant (zie paragraaf 1.3, pagina's 14 en 15). De gemodelleerde stijghoogten wijken in het diepere systeem, waar de zoetwaterlens zich bevindt waaruit wordt onttrokken, minder af van de metingen. De afwijkingen in de diepere modellagen, zoals de modellagen 8 en 14, zijn kleiner en bevinden zich voornamelijk in het noorden van het studiegebied.

De model resultaten zijn ook geëvalueerd door de temporele variaties en dynamiek van de waargenomen en gesimuleerde freatische grondwaterstanden te vergelijken. Figuur 13 toont tijdreeksen van stijghoogten van verschillende observatieputten naast de gesimuleerde waarden voor de referentiesituatie. De locaties van deze observatieputten zijn weergegeven in Figuur 14.



Figuur 13: Enkele tijdreeksen van waargenomen (zwarte lijnen) en gesimuleerde (blauwe lijnen) stijghoogten voor het model van de referentiesituatie. NSE = Nash-Sutcliffe efficiëntiewaarde; R<sup>2</sup> = determinatiecoëfficiënt. Niet alle observatieputten in het duingebied worden weergegeven.

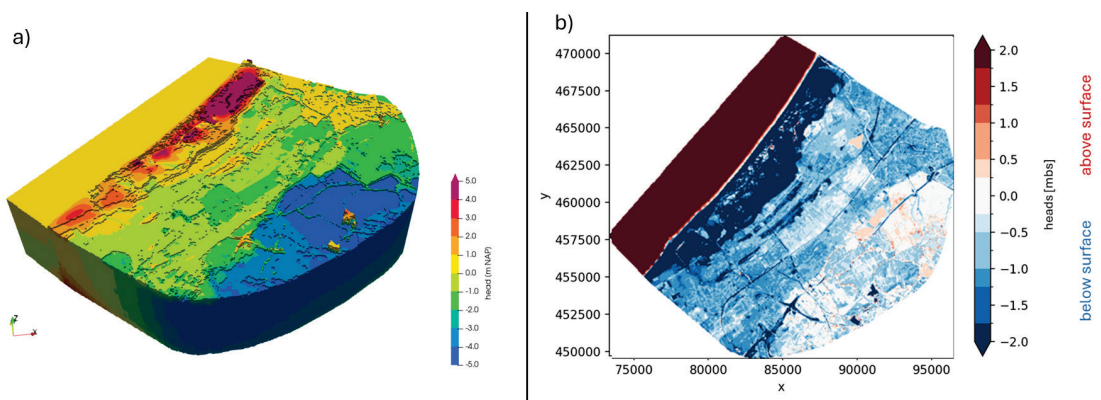


Figuur 14: Locatie van de observatieputten die zijn gebruikt voor de evaluatie van de prestaties van het niet-stationaire model. NSE = Nash-Sutcliffe efficiëntiewaarde; R<sup>2</sup> = determinatiecoëfficiënt. Symboolkleuren en -groottes op de kaart geven respectievelijk R<sup>2</sup>- en NSE-waarden aan. Op de rechterpanelen wordt het bereik van deze metriek weergegeven.

Figuur 13 laat zien dat over het algemeen de (afwezigheid van de) dynamiek in stijghoogte redelijk wordt voorspeld, maar dat er een mismatch is tussen de absolute waarden van gesimuleerde en waargenomen stijghoogten, vooral bij de observatieputten met hoge stijghoogte (in Figuur 13 bijvoorbeeld S\_WP\_Z04\_1, PB\_428\_1, PB\_430\_1, PB\_543\_1, PB\_143A\_1). Een verklaring kan zijn dat de relatief grote celgrootte van het model (gridcellen van 50 x 50 m<sup>2</sup>) voor het duingebied met over korte afstand grote verschillen in maaiveldhoogte de gemeten observaties van de ondiepe stijghoogten niet nauwkeurig genoeg kan nabootsen. Met andere woorden, de variabiliteit van de waargenomen input- en outputwaarden lijkt kleiner dan de ruimtelijke schaal van het model. Daarnaast is het model dat in deze studie werd gebruikt, alleen zijn gekalibreerd op basis van gemiddelde grondwaterwaarden met tijdstapgrootte van één kwartaal, en niet voor niet-stationaire situaties. Herijking van het model is echter niet het hoofddoel van deze studie. En de seizoensdynamiek en algemene trends in grondwaterstijghoogten zijn voor de meeste (diepere) waarnemingspunten goed weergegeven.

De waterbalans van de gesimuleerde infiltratieplassen binnen het Dunea-gebied is gecontroleerd en vergeleken met het werkelijke volume dat Dunea aangeeft als rivierwaterinname in de afgelopen jaren (Dunea, 2022). Wanneer wordt aangenomen dat de totale hoeveelheid ingenomen rivierwater wordt gebruikt voor infiltratie via plassen, zouden de gesimuleerde geïnfiltreerde waterhoeveelheden en de gerapporteerde waarden overeen moeten komen. Volgens het rapport is de afgelopen jaren gemiddeld ~9200 m<sup>3</sup>/uur opgenomen, terwijl het gemiddelde gesimuleerde infiltratiewater via plassen ~9800 m<sup>3</sup>/uur bedraagt (Bijlage 8A.2).

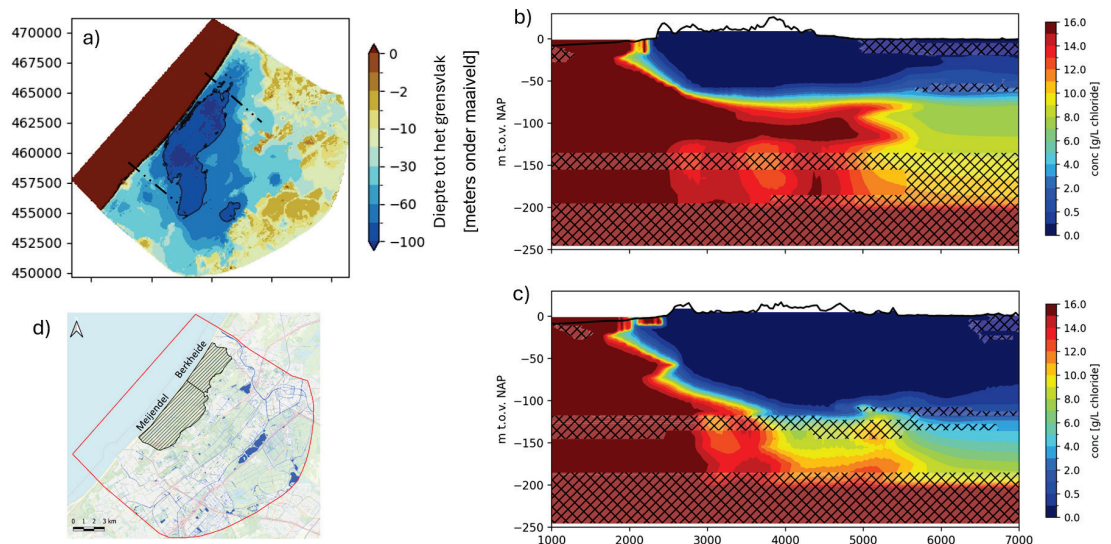
Figuur 15 toont de gesimuleerde stijghoogten voor het domein, evenals de freatische stijghoogten in de bovenste actieve modellagen. Dit laatste dient ook als indicatie van waar hoge grondwaterstanden voorkomen, en dus waar een hoog vochtgehalte in de lokale bodems kan worden verwacht. Dit geldt vooral voor de oostelijke regio's van het modeldomein, met name nabij de poldergebieden.



Figuur 15: a) Gesimuleerde stijghoogten in 3D (van bovenaf is de waarde in de modellaag die het eerst actief is zichtbaar); b) diepte van de grondwaterstand vanaf het maaiveld. Negatieve waarden (rode en roze kleuren) duiden op water boven het maaiveld.

Voor de referentiesituatie is het totale zoetwatervolume (met minder dan 0.15 g Cl/L, met een effectieve porositeit van 30%) voor de gebieden Meijndel en Berkheide geschat op ongeveer 1057 Mm<sup>3</sup>. Dit getal ligt dicht in de buurt ligt van de 1100 Mm<sup>3</sup> die eerder werd berekend door Boonekamp et al. (2021). Het grootste deel van het zoetwater bevindt zich onder het duingebied, waar de zoetwaterlens zich uitstrekt tot ongeveer 100 meter onder de grond.

Figuur 16a toont de diepte van het grensvlak tussen zoet en zout grondwater. De drempelwaarde voor de bepaling van deze positie van het eerste grensvlak dat we in de ondergrond tegenkomen van bovenaf<sup>5</sup>, is wederom een chlorideconcentratie van 0.15 g Cl/L. Hoewel de juiste benaming eigenlijk 'zoet-brak grensvlak' is, wordt in deze rapportage de term 'zoet-zout grensvlak' aangehouden. In de buurt van de poldergebieden ligt het zoet-zout grensvlak veel ondieper, tussen 2 en 10 meter onder het maaiveld.



Figuur 16: a) Diepte tot het zoet-zout grensvlak (chlorideconcentratie van 0.15 g Cl/L, en meters onder maaiveld); dwarsdoorsnede van het duingebied bij respectievelijk het noordelijk (b) en zuidelijk (c) gebied, met de chlorideconcentratie verdeling grondwater en slechtdoorlatende weerstandslagen gemarkeerd (gearceerde gebieden); d) locaties Meijndel en Berkheide.

## 4.2 Zeespiegelstijging scenario's

In deze scenario's worden de verschillende zeespiegelstijgingen gesimuleerd. De resultaten worden vergeleken met de referentiesituatie en het autonome scenario (te weten geen veranderingen van het zeeniveau). Tijdens deze modelberekeningen zijn de waarden en de ruimtelijke variaties voor de grondwateraanvulling niet veranderd ten opzichte van de huidige waarden. Met deze opzet zijn alleen de effecten van een zeespiegelstijging op het grondwater systeem te beoordelen.

Tabel 5 toont de berekende zoetwatervolumes voor de verschillende zeespiegelstijging scenario's en hun vergelijking met de referentiesituatie. Figuur 17 toont de temporele veranderingen van de zoetwatervolumes van elk scenario.

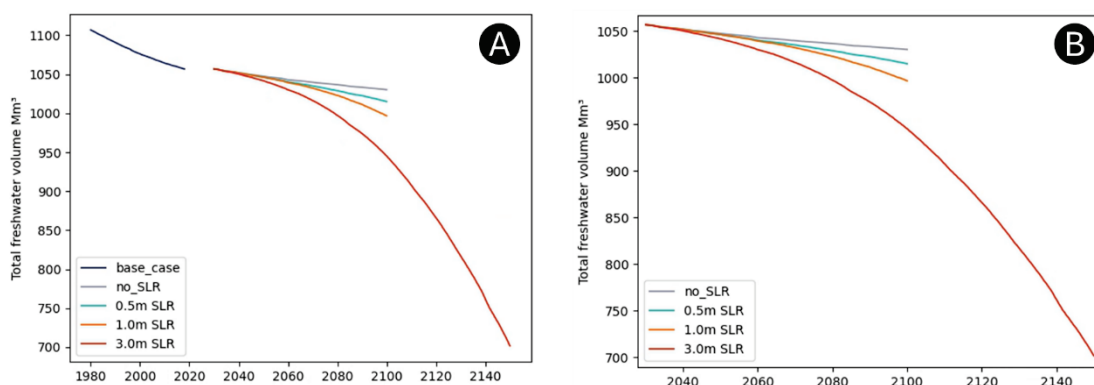
<sup>5</sup> In veel kustgebieden is het zoet-brak-zoute grondwater complex verdeeld door de heterogene ondergrond en historische gebeurtenissen zoals variërende zeespiegelstanden over honderden tot duizenden jaren (Post et al., 2013) en meer recent overstromingen van zout zeewater tijdens stormvloed (Cantelon et al., 2023). Slechtdoorlatende (klei)lagen kunnen zoet grondwater langdurig insluiten in een brakke of zoute omgeving, wat leidt tot meerdere zoet-zout grensvlakken. Zulke zout-zout inversies zijn waargenomen in saliniteitsmetingen in Zuid-Holland (Oude Essink and Forzoni, 2018) en aangetoond in Zeeland tijdens intensieve geofysische karteringen (Van Baaren et al., 2016a).

Tabel 5: Berekend zoetwatervolume voor de referentiesituatie en de vier verschillende zeespiegelstijging scenario's.

Scenario	Laatste simulatiejaar	Zoetwatervolume [Mm <sup>3</sup> ]	Verandering ten opzichte van referentie situatie
<b>Referentiesituatie</b>	2020	1057.0	
<b>no_SLR</b>	2100	1030.3	-2.5%
<b>0.5m SLR</b>	2100	1015.0	-4.0%
<b>1.0m SLR</b>	2100	996.8	-5.7%
<b>3.0m SLR</b>	2150	701.7	-33.6%

In de referentiesituatie neemt het zoetwatervolume af over de periode 1980-2018 (Figuur 17a, base case, zwarte lijn). Ondanks inspanningen om een stabielere initiële zoet-zout verdeling te verkrijgen lijkt het erop dat er in deze regio een stevig autonoom verziltingproces gaande is. Zonder zeespiegelstijging (no\_SLR, Tabel 5) is het zoetwatervolume tegen 2100 met bijna 27 Mm<sup>3</sup> afgenomen (autonome verzilting). Bij de vier zeespiegelstijging scenario's geven de modelberekeningen een afname van de zoetwatervolumes aan.

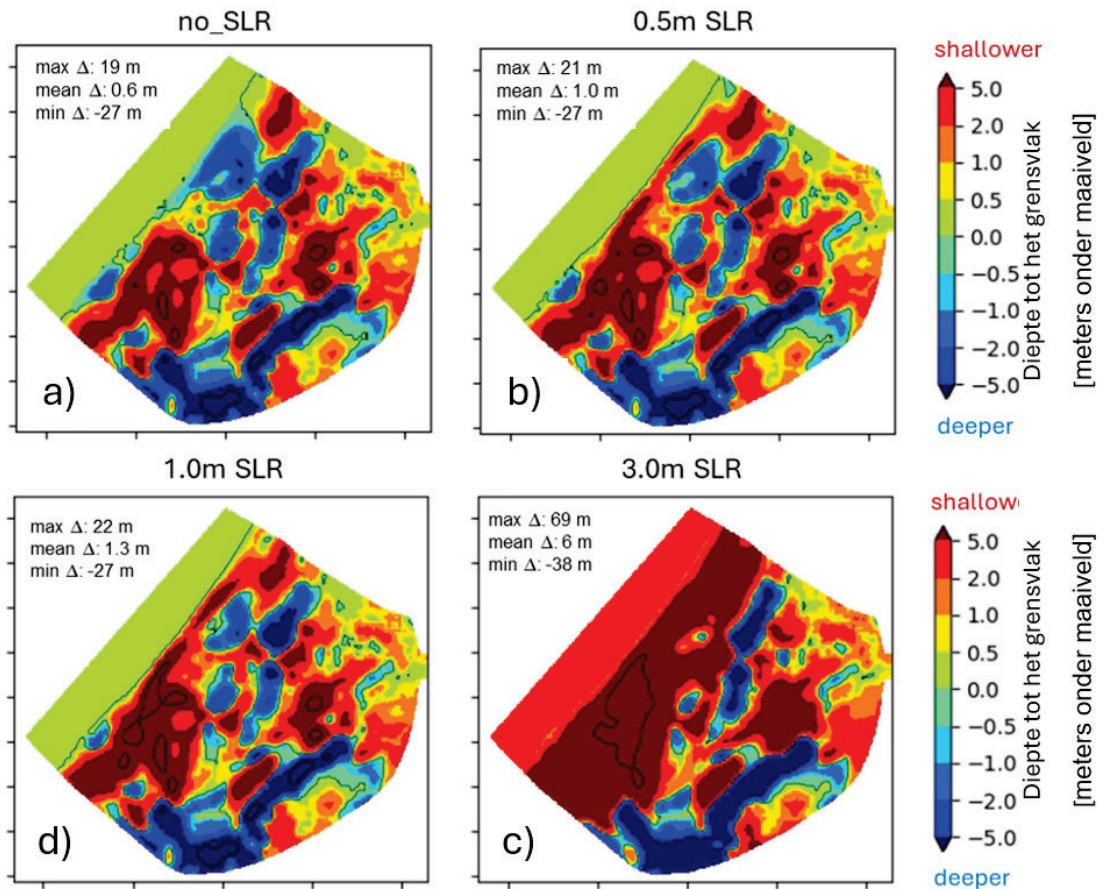
Voor het jaar 2150 is bij een extreme zeespiegelstijging van 3.0 m de afname van de zoetwatervoorraad vanzelfsprekend het grootst, namelijk bijna 34% minder in vergelijking met de zoetwatervoorraad van de referentiesituatie in 2020. Ook voor het jaar 2100 is de afname van de zoetwatervoorraad bij het scenario 3.0m SLR significant meer in vergelijking met het scenario 1.0m SLR, terwijl de absolute zeespiegelstijging (zie Figuur 7b, pagina 24) op dat moment in 2100 niet eens zoveel meer is. Het lijkt erop dat bij de scenario's met grotere zeespiegelstijgingen een versnelling van de afname van het volume in gang wordt gezet, doordat bijvoorbeeld over een groter gebied het maaiveld wordt geraakt (zie voor het concept Figuur 2, pagina 12). Bij het scenario 3.0m SLR is de versnelling van de afname duidelijk meer dan bij het scenario 1.0m SLR (zie Figuur 17b).



Figuur 17: a) Het totale zoetwatervolume geschat voor de referentiesituatie ('base case', opwarmperiode 1980-2018) en voor de vier zeespiegelstijging scenario's. Zoet water is berekend voor beide productiegebieden (Meijendel en Berkheide) en beperkt tot 0.15 g Cl/L; b) zoom naar 2030-2150 periode.

Zoals verwacht verandert ook de diepte tot het zoet-zout grensvlak tussen de gesimuleerde scenario's, zie Figuur 18. De maximale, gemiddelde en minimale waarden van deze veranderingen (respectievelijk *max*  $\Delta$ , *gemiddelde*  $\Delta$  en *min*  $\Delta$ ) worden ook weergegeven in de kaarten. De maximumwaarde geeft de grootste verandering in opwaartse richting aan (d.w.z. het grensvlak wordt ondieper in vergelijking met de huidige situatie), terwijl de minimumwaarde de grootste verandering in neerwaartse richting aangeeft (d.w.z. het grensvlak wordt dieper in

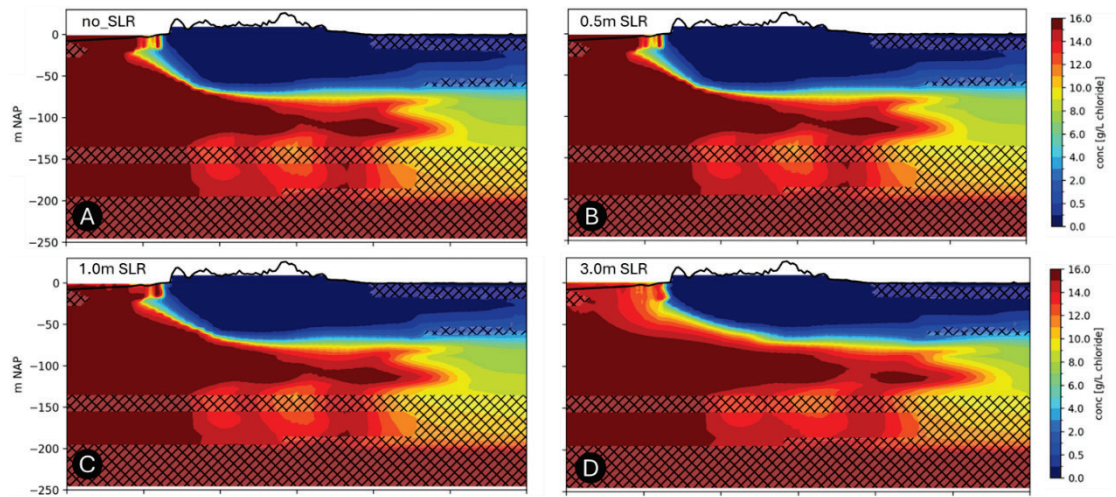
vergelijking met de huidige situatie). De gemiddelde waarde geeft de gemiddelde verandering in de diepte van het grensvlak voor het hele modeldomein aan (d.w.z. positieve waarden geven aan dat het grensvlak ondieper wordt en negatieve waarden geven aan dat het grensvlak dieper wordt).



*Figuur 18: Totale verandering van de diepte van het zoet-zout grensvlak ten opzichte van de referentiesituatie tegen 2100 (2150 voor het 3.0 m zeespiegelstijging scenario). Rode kleuren geven aan dat het grensvlak ondieper is dan in de referentiesituatie, terwijl blauwe kleuren aangeven dat het grensvlak dieper is dan in de referentiesituatie. De maximale, gemiddelde en minimale waarden van deze veranderingen (respectievelijk max  $\Delta$ , gemiddelde  $\Delta$  en min  $\Delta$ ) worden ook weergegeven.*

In het algemeen beweegt het zoet-zout grensvlak zich in alle gesimuleerde scenario's omhoog bij het zuidwestelijke deel van het gemodelleerde gebied, wat duidt op een algemene verzilting daar ter plaatse. Dit betekent een lokale afname van het zoetwatervolume, terwijl de noordelijke gebieden minder effect lijken te hebben.

Op andere locaties verschuift het zoet-zout grensvlak naar beneden (dieper grensvlak dan in de referentiesituatie), zoals bijvoorbeeld in het gebied Berkheide, wat duidt op een lokale uitbreiding van de zoetwaterlens. Bij een zeespiegelstijging van 3.0 m is tegen het jaar 2150 in de directe kuststrook het zoet-zout grensvlak bij alle scenario's ondieper. Figuur 19 toont een dwarsdoorsnede van het kustgebied voor de verschillende zeespiegelstijging scenario's.



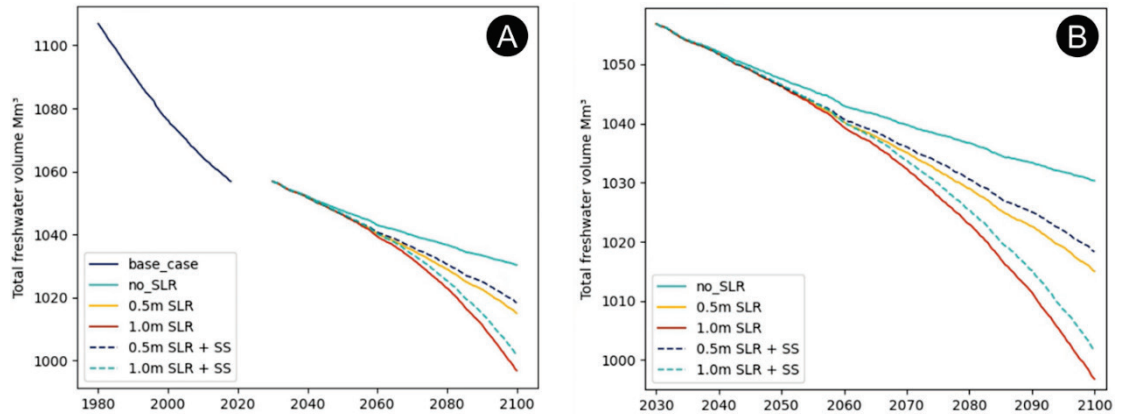
Figuur 19: Dwarsdoorsnede van de duinen (zuidelijk gebied) met de zoet-zout verdeling en slecht doorlatende weerstandslagen gemarkeerd (gearceerde gebieden). a) geen zeespiegelstijging, b) 0.5 m zeespiegelstijging, c) 1.0 m zeespiegelstijging, en d) 3.0 m zeespiegelstijging (2150).

### 4.3 Zandsuppletie scenario

In dit scenario wordt de zandsuppletie strategie geïmplementeerd, waarbij de hoeveelheid toegevoegd zand de snelheid van de zeespiegelstijging volgt. De totale hoeveelheid zand die tegen 2100 wordt toegevoegd in het modelgebied bedraagt ongeveer 9.6 Mm<sup>3</sup> en 19.1 Mm<sup>3</sup> voor respectievelijk de zeespiegelstijging scenario's van 0.5 en 1.0 m.

Voor beide gevallen laten de modelberekeningen een groter zoetwatervolume zien in vergelijking met de respectieve zeespiegelstijging scenario's zonder suppleties (Figuur 20). De zandsuppletie komt neer op een toename van ongeveer 3.3 Mm<sup>3</sup> en 5.1 Mm<sup>3</sup> zoet grondwater dat extra geborgen kan worden in de ondergrond voor respectievelijk de zeespiegelstijging scenario's van 0.5 en 1.0 m.

De reden dat er aanzienlijk meer zoet grondwater kan worden geborgen dan zonder zandsuppleties is deels weergegeven in Figuur 2 (pagina 12). Zandsuppletie maakt het mogelijk om, buiten stormmomenten, zoet regenwater te laten infiltreren. Normaal zou dit regenwater afstromen wanneer de grondwaterstand het maaiveld bereikt. Met meer ruimte in de onverzadigde zone door zandsuppleties kan echter meer water worden opgeslagen, waardoor de grondwaterstand stijgt en als gevolg daarvan de zoetwaterlens dieper wordt. Het dieper, en daarmee groter, worden van de zoetwaterlens bij een hogere freatische grondwaterstand is een bekend principe in de hydrogeologie van kustgebieden: het Badon Ghijben-Herzberg-principe, waarbij een stijging van de grondwaterstand van 1 meter resulteert in een verdiepte zoetwaterlens van ongeveer 40 meter (zie Bijlage 8A.4, pagina 64). Deze verhouding van 1 op 40 is theoretisch en houdt geen rekening met beperkende factoren zoals kleilagen, die de verdere uitbreiding van de lens kunnen beperken.



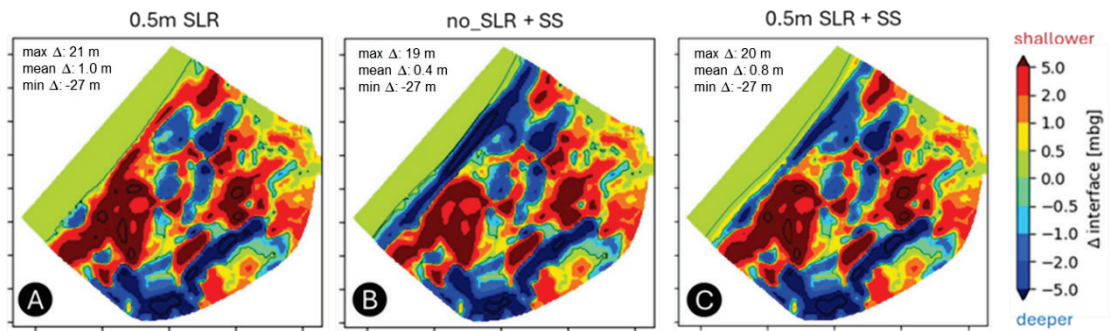
Figuur 20: a) De totale zoetwatervolume geschat voor verschillende zeespiegelstijging scenario's met en zonder zandsuppletie (SS). Zoet water is berekend voor beide productiegebieden (Meijendel en Berkheide) en beperkt tot 0.15 g Cl/L. b) ingezoomd op de periode 2030-2100.

De resultaten van meerdere scenario's, al dan niet met zandsuppletie en/of zeespiegelstijging, zijn uitgezet in Tabel 6. In de tabel zijn de directe effecten op de zoetwaterlens te zien van zandsuppleties (d.w.z. alleen een zandsuppletie die zou behoren bij een zeespiegelstijging van 0.5 m in 2100). Zonder een zeespiegelstijging (scenario's met no\_SLR) zou de (autonome) verzilting in de grondwatersysteem door een zandsuppletie afnemen; er wordt een kleinere afname van de zoetwaterlens waargenomen in vergelijking met het autonome situatie, respectievelijk no\_SLR + SS = -2.2% en no\_SLR = -2.5% (Tabel 6). De suppletie van zand leidt ook tot een kleinere afname van de zoetwaterlens onder zeespiegelstijgingscondities. De modelberekeningen laten in de tabel een groter zoetwatervolume zien in vergelijking met twee zeespiegelstijging scenario's 0.5 m en 1.0 m.

Tabel 6: Berekend zoetwatervolume voor verschillende scenario's van zeespiegelstijging (SLR) in combinatie met zandsuppletie (SS).

Scenario	Laatste simulatiejaar	Zoetwatervolume [Mm³]	Verandering ten opzichte van referentie situatie
<b>Referentiesituatie</b>	2020	1057.0	
<b>no_SLR</b>	2100	1030.3	-2.5%
<b>no_SLR + SS</b>	2100	1033.4	-2.2%
<b>0.5m SLR</b>	2100	1015.0	-4.0%
<b>0.5m SLR + SS</b>	2100	1018.3	-3.7%
<b>1.0m SLR</b>	2100	996.8	-5.7%
<b>1.0m SLR + SS</b>	2100	1001.7	-5.2%

Net als bij de zeespiegelstijging scenario's verandert bij de zandsuppleties ook de diepte van het zoet-zout grensvlak. Over het algemeen verschuift het zoet-zout grensvlak naar beneden rond de locaties waar zand wordt gesuppleerd (Figuur 21). Dit wordt vooral waargenomen in het scenario waarin de suppletie plaatsvindt zonder zeespiegelstijging (no\_SLR + SS), omdat in dat scenario de effecten van alleen zandsuppleties te zien zijn.



Figuur 21: Totale verandering van de diepte van het zoet-zout grensvlak ten opzichte van de referentiesituatie tegen 2100. Rode kleuren geven aan dat het grensvlak ondieper is dan in de referentiesituatie, terwijl blauwe kleuren aangeven dat het grensvlak dieper is dan in de referentiesituatie. De maximale, gemiddelde en minimale waarden van deze veranderingen (respectievelijk max  $\Delta$ , gemiddelde  $\Delta$  en min  $\Delta$ ) worden ook weergegeven.

In alle scenario's (dus ook buiten de zandsuppletie scenario's) is overigens geen rekening gehouden met enige vorm van kusterosie of kustuitbreiding zoals de Zandmotor. Beide processen kunnen het zoetwatervolume op termijn beïnvloeden.

#### 4.4 Bodemdaling scenario

De effecten van alleen bodemdaling zijn in principe vergelijkbaar met de effecten van alleen zeespiegelstijging<sup>6</sup>. Qua orde-grootte afname zoetwatervolume laat Tabel 7 dan ook zien dat het verschil tussen de scenario's zeespiegelstijging (van 0.5 m) en bodemdaling (0.4 m rond de polders in het binnenland, zie ook Figuur 9) niet groot is.

Er zijn echter fundamentele verschillen tussen de twee processen: de bodemdaling vindt plaats aan de andere kant van het zoetwatervolume bij Dunea waar andere hydrogeologische condities heersen. De daling van de bodem is gedifferentieerd over het poldergebied verdeeld en afhankelijk van onder andere de aanwezigheid en hoeveelheid veen in de ondergrond. Bovendien is er sprake van een afname van de waterdruk, in tegenstelling tot een toename.

In de ruimtelijke verdeling van de diepte van het zoet-zout grensvlak tegen 2100 is wel een verschil waarneembaar. Figuur 23, pagina 41, laat zien dat de verandering in de diepte van het zoet-zout grensvlak ten opzichte van de referentiesituatie significant is langs de kuststrook bij een scenario van zeespiegelstijging (vergelijk Figuur 23a met b) Dit is in contrast met het scenario van een bodemdaling waarbij nauwelijks een verandering in de positie van het grensvlak te zien is (vergelijk Figuur 23a met d). Het verschil in zichtbaarheid van het effect op het grensvlak kan waarschijnlijk worden toegeschreven aan de hydraulische weerstand van de ondergrond; aan de kant waar een zeespiegelstijging plaatsvindt is de weerstand tussen het zeeniveau en het grondwatersysteem kleiner dan in het poldergebied waar het effect van een polderpeilverlaging door bodemdaling aanzienlijk wordt gedempt door een hogere weerstand.

<sup>6</sup> In literatuur over de effecten van bodemdaling gaat het ook meestal over een relatieve zeespiegelstijging, dus bodemdaling en zeespiegelstijging gecombineerd (Ingebritsen and Galloway, 2014; Nicholls et al., 2021).

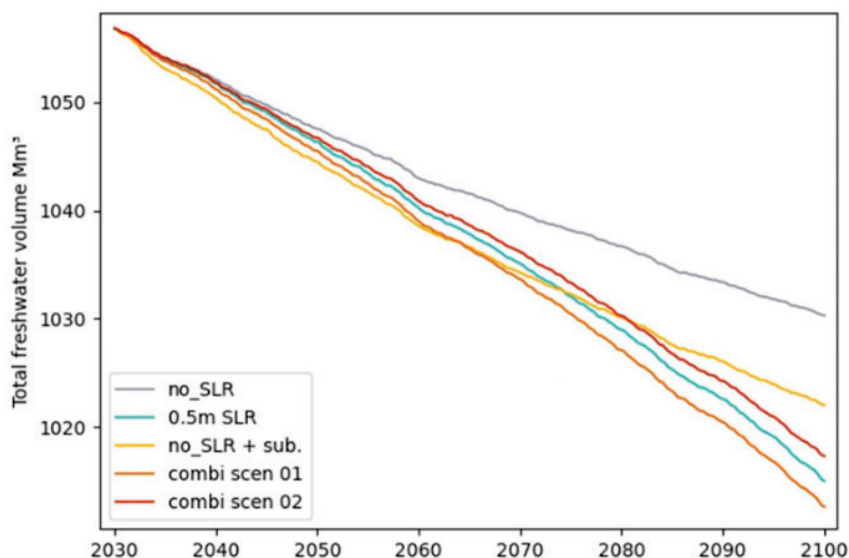
Tabel 7: Berekend zoetwatervolume voor 0.5 m zeespiegelstijging, bodemdaling en voor de gecombineerde scenario's.

Scenario	Laatste simulatiejaar	Zoetwater volume [Mm <sup>3</sup> ]	Verandering ten opzichte referentie situatie
Referentiesituatie	2020	1057.0	
0.5m SLR	2100	1015.0	-4.0%
no_SLR + sub. (bodemdaling)	2100	1022.0	-3.3%
combi scen 01 (-3% GWR)	2100	1012.6	-4.2%
combi scen 02 (+3% GWR)	2100	1017.3	-3.8%

## 4.5 Gecombineerde scenario's

Een tweetal gecombineerde runs zijn uitgevoerd om gecombineerde effecten op de ontwikkeling van zoetwaterlenzen in het studiegebied te beoordelen. Een gecombineerd scenario omvat het meest waarschijnlijke scenario met meerdere processen dat zich in 2100 zal kunnen voordoen. De volgende twee gecombineerde scenario's zijn doorgerekend: a. een zeespiegelstijging van 0.5 m, b. een bodemdaling (0.4 m rond de polders in het binnenland, zie Figuur 9) en c. veranderingen in de grondwateraanvulling, zowel van -3% afname ('combi scen 01') als tot +3% toename ('combi scen 02').

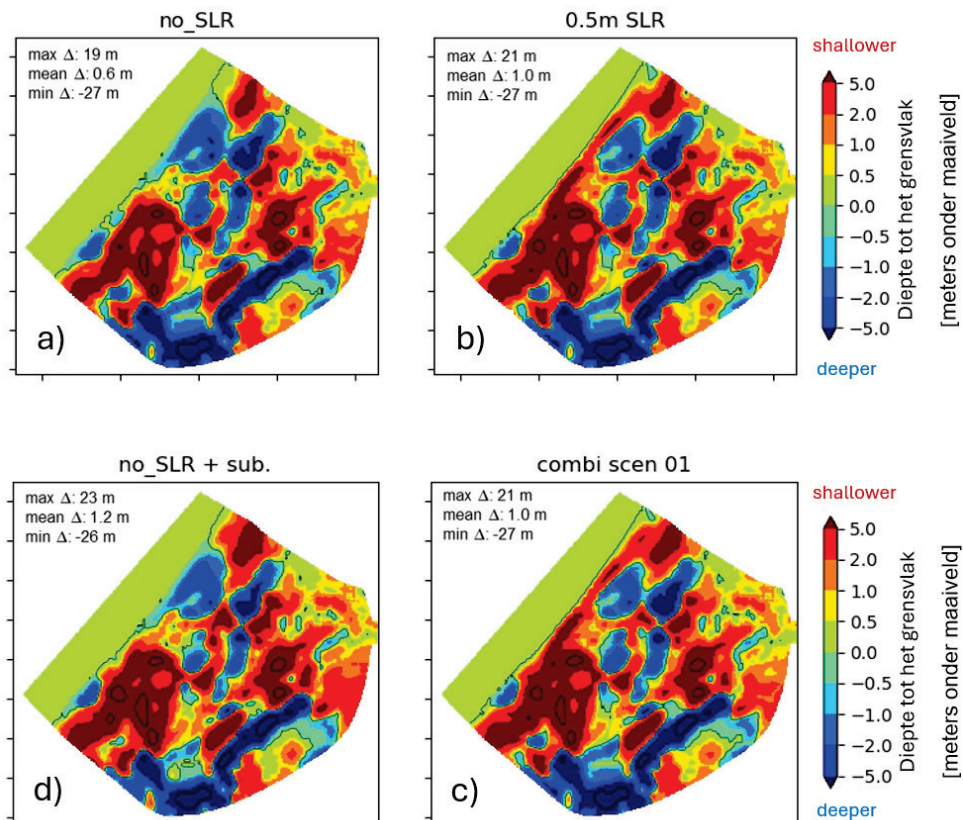
Zoals verwacht leidt bodemdaling tot een grotere afname van het zoetwatervolume in het gebied, vooral wanneer tegelijkertijd zeespiegelstijging plaatsvindt (Figuur 22). Afhankelijk van de waarden van de grondwateraanvulling kunnen deze effecten groter zijn. Zo is de afname in zoetwatervolume nog groter bij een afname in grondwateraanvulling ('combi scen 01' in Figuur 22) dan in het scenario waarin de grondwateraanvulling toeneemt ('combi scen 02' in Figuur 22). Het relatieve verschil daartussen is ongeveer 0.5% of 5 Mm<sup>3</sup> zoetwater, zie Tabel 7.



Figuur 22: Totale zoetwaterhoeveelheid geschat voor verschillende scenario's. Het zoetwatervolume is berekend voor beide productiegebieden (Meijndel en Berkheide) en beperkt tot 0.15 g Cl/L.

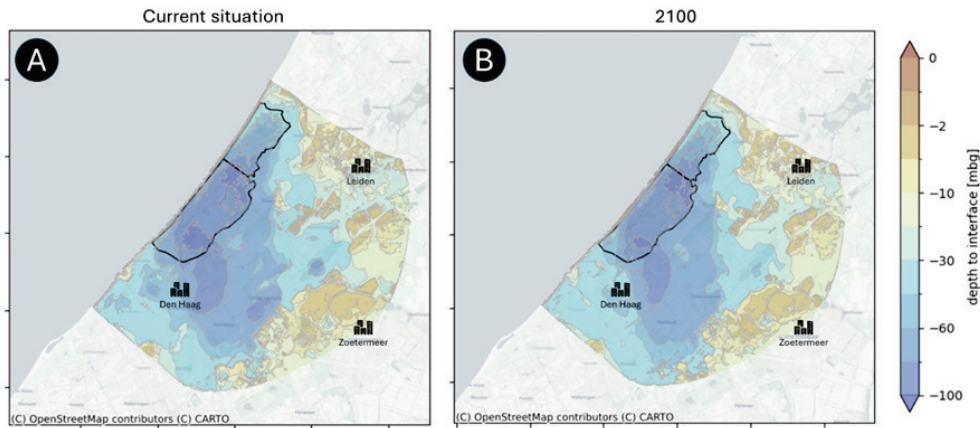
Figuur 23 toont de verandering van het zoet-zout grensvlak voor het bodemdaling scenario ('no\_SLR + sub.') en het gecombineerde scenario 01 ('combi scen 01'). De resultaten van het gecombineerde scenario 02 ('combi scen 02') zijn redelijk vergelijkbaar en worden daarom niet weergegeven. De scenario's autonoom ('no\_SLR') en zeespiegelstijging 0.5 m ('0.5m SLR') worden ook weergegeven om de resultaten te vergelijken.

De nuances zijn klein wat betreft de (gemiddelde) beweging van het zoet-zout grensvlak. Ruimtelijk variëren de absolute opwaartse of neerwaartse bewegingen wel significant. De verschillen in het directe kustgebied zijn vanzelfsprekend gedreven voor een zeespiegelstijging, waarbij het grensvlak omhoog komt bij de scenario's met een zeespiegelstijging (rode gebieden in de kustzone bij de Figuur 23 b en c). De veranderingen in het zoet-zout grensvlak tussen de scenario's van een zeespiegelstijging van 0.5 m ('0.5m SLR') en het gecombineerde scenario 01 ('combi scen 01') zijn verwaarloosbaar.



Figuur 23: Totale verandering in de diepte van het zoet-zout grensvlak tegen 2100 ten opzichte van de referentiesituatie. Rode kleuren geven een ondieper en blauwe kleuren een dieper grensvlak aan ten opzichte van de referentiesituatie. De maximale, gemiddelde en minimale veranderingen (max  $\Delta$ , gemiddelde  $\Delta$ , min  $\Delta$ ) worden ook weergegeven.

Figuur 24 toont kaarten met de diepte tot het zoet-zout grensvlak met de locaties van de productiegebieden van Dunea, voor de huidige situatie (a) en voor de situatie in 2100 bij zeespiegelstijging, bodemdaling en verminderde grondwateraanvulling (gecombineerd scenario 01 ('combi scen 01')). Figuur 23c toont het verschil tussen de positie van het grensvlak nu en in 2100. In het poldergebied, waar het grensvlak omhoog komt (de rode gebieden), zal waarschijnlijk zoute kwel optreden als dit grensvlak ondiep ligt.



Figuur 24: Vergelijking van de diepte tot het zoet-zout grensvlak tussen zoet en zout grondwater tussen (a) de huidige situatie, en (b) het gecombineerde scenario 01, d.w.z. inclusief zeespiegelstijging, bodemdaling en verminderde grondwateraanvulling (-3%) voor het jaar 2100.

Gebieden aan de rand van de dikke zoetwaterlens, zoals rond de stad Den Haag, waar het grensvlak momenteel meer dan 70 m onder het maaiveld ligt, kan te maken gaan krijgen met verzilting en een krimp van de zoetwaterlens.

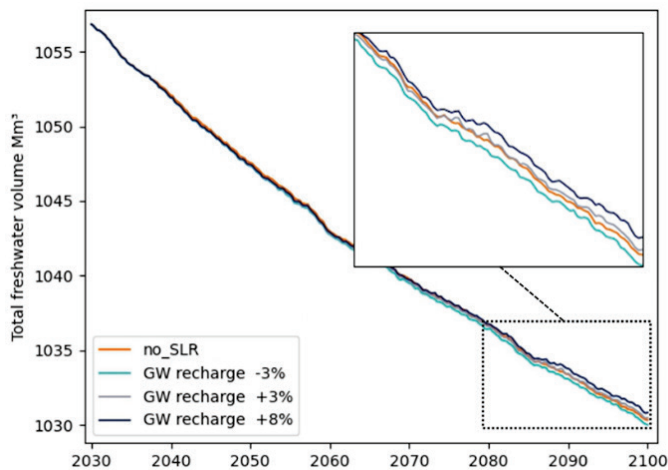
#### 4.6 Grondwateraanvulling scenario's

Met deze scenario's worden de zuivere effecten van de drie grondwateraanvulling scenario's (-3% (Hd van KNMI'23), +3% (Ln van KNMI'23) en +8% (Hn van KNMI'23), zie paragraaf 2.3.3, pagina 6) beoordeeld. Dit is weliswaar geen volledige gevoeligheidsanalyse, maar geeft toch het inzicht in de orde effecten van dit type veranderingen op het zoet-zout grondwatersysteem.

In eerste instantie lijkt het erop dat veranderingen in grondwateraanvulling geen grote effecten hebben op de ontwikkeling van de zoetwaterlens van Dunea (Figuur 25). Het verschil tussen het scenario zonder een verandering in grondwateraanvulling en de drie scenario's met veranderde grondwateraanvulling (-3%, +3% en +8%) is kleiner dan 1%. Omdat de veranderingen minimaal zijn, wordt de kaarten met verandering in de diepte van het zoet-zout grensvlak niet getoond.

Grondwateraanvulling in het freatische pakket betekent niet automatisch dat het geïnfiltreerde water het diepere grondwater bereikt om het volume van de zoetwaterlens te vullen. Weerstandslagen in het topsysteem kunnen ervoor zorgen dat de diepere zoetwaterlens nauwelijks wordt aangevuld. Daarnaast kunnen grondwateronttrekkingen in winputten het geïnfiltreerde zoete water afvangen, waardoor het niet bijdraagt aan de vorming van de zoetwaterlens. Te grote onttrekkingen kunnen bovendien opkegeling van brak tot zout grondwater veroorzaken.

Tenslotte is het belangrijk om te beseffen dat de kunstmatige infiltratiesystemen van Meijendel en Berkheide een grote invloed hebben op de totale grondwateraanvulling in het duingebied. Het gaat hierbij grotendeels om kunstmatige infiltratieplassen met een min of meer vast peil. In het model zijn de plassen eveneens met een vast peil opgenomen. Een grotere natuurlijke grondwateraanvulling resulteert in een kleiner verhang vanaf de plassen en daarmee in reductie van de kunstmatige grondwateraanvulling. Het effect van een toe- of afname van de natuurlijke grondwateraanvulling op de zoetwaterlens wordt hierdoor gedempt.



Figuur 25: Het totale zoetwatervolume geschat voor verschillende scenario's voor grondwateraanvulling (GWR -3%, GWR +3% en GWR +8%). De effecten zijn minimaal, zelfs onder het +8% scenario. De inzet toont een ingezoomd beeld van de laatste 20 jaar van de berekening om de (marginale) verschillen in de resultaten alsnog te benadrukken.

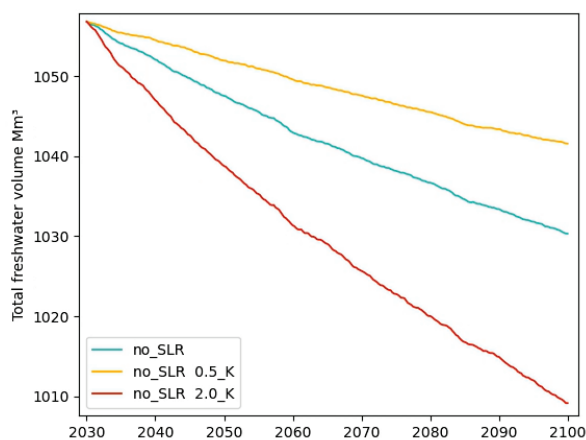
Het is de moeite waard om te vermelden dat met een toename van +8% grondwateraanvulling de afname in zoetwatervolume ten opzichte van het autonome scenario binnen het Dunea-gebied enigszins wordt afgezwakt (Bijlage 8A.3, pagina 63).

#### 4.7 Gevoeligheid voor geologie

Met twee scenario's is de gevoeligheid van het resultaat voor onzekerheid in de geologie verkend. Hiertoe is de doorlatendheid in het model (K-waarden) verdubbeld (no\_SLR 2\_K) en gehalveerd (no\_SLR 0.5\_K). In vergelijking met het autonome scenario (d.w.z. no\_SLR) bedragen de absolute veranderingen tot 2% (Figuur 26, Tabel 8).

De analytische vergelijkingen van de diepte van de zoetwaterlens en het zoetwatervolume (zie Bijlage 8A.4, Vergelijkingen 1 en 2, pagina 64) laat zien dat het theoretische volume aan zoet grondwater in de zoetwaterlens omgekeerd evenredig is aan de wortel van de hydraulische conductiviteit (of de doorlatendheid, met symbool K) van het duingebied.

De analyse toont aan: hoe groter de doorlatendheid (K), hoe kleiner de zoetwaterlens. Een goed doorlatend watervoerend pakket vereist immers slechts een kleine gradiënt (volgens de wet van Darcy) om grondwater af te voeren. Een kleinere gradiënt resulteert in een relatief lage grondwaterstand en daarmee een ondiepere zoetwaterlens en een kleinere zoetwatervolume.



Figuur 26: Het totale zoetwatervolume geschat voor scenario's met verschillende waarden voor de doorlatendheid. De effecten zijn groter dan de effecten van zeespiegelstijging scenario's.

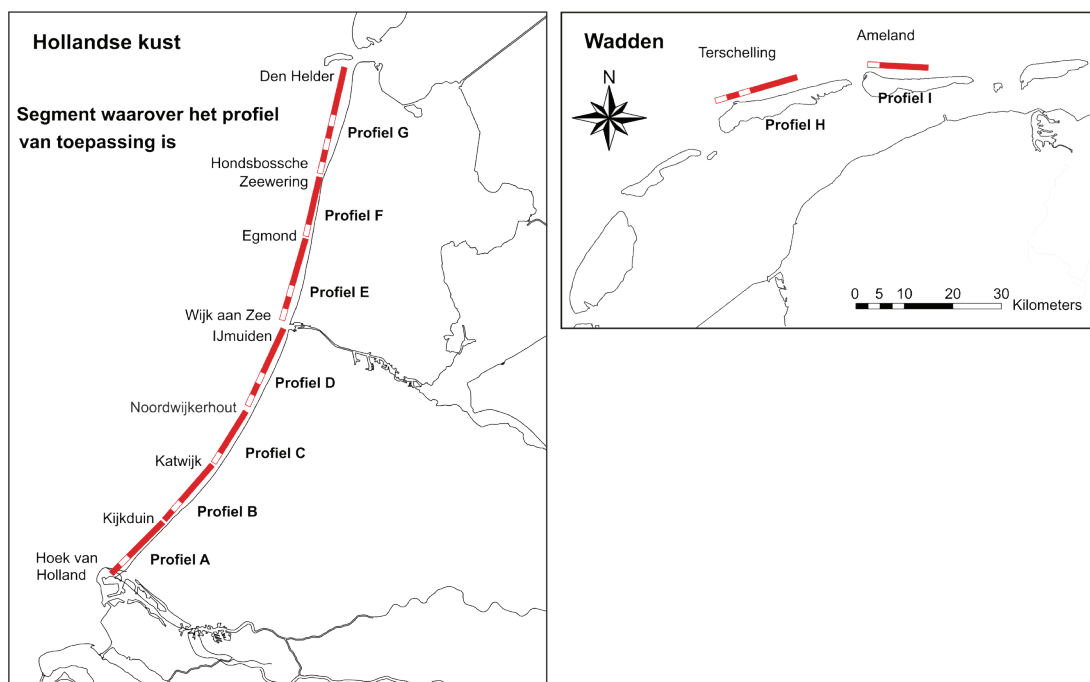
Tabel 8: Berekend zoetwatervolume voor de scenario's voor twee verschillende hydraulische doorlatendheden (K). In het scenario 0.5\_K wordt de hydraulische doorlatendheid kleiner (\* 0.5) gemaakt en in het scenario 2.0\_groter gemaakt (\*2.0).

Scenario	Laatste simulatiejaar	Zoetwatervolume [Mm <sup>3</sup> ]	Verandering van no_SLR
no_SLR	2100	1030.3	
0.5_K	2100	1041.6	+1.1%
2.0_K	2100	1009.1	-2.0%

## 5 Resultaten van de 2D zoet-zout profiel modellen

Het hoofddoel van deze analyse met conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen is om een indruk te krijgen van de effecten van zeespiegelstijging in andere gebieden dan het Dunea drinkwaterwinningsgebied.

De focus van deze snelle analyse ligt bij het scenario van 3.0 m zeespiegelstijging in 2150 (de zeespiegelstijging in dit scenario is in 2100 1.35 m). Bij dit scenario zijn de grootste effecten te zien. De locatie van deze 2D modellen is nogmaals te zien in Figuur 27.



Figuur 27: De locaties van de negen segmenten waarvoor conceptuele 2D modellen zijn opgesteld (voor beschrijving details, zie Hoofdstuk 3).

Tabel 9 toont het percentage zoetwatervolume dat overblijft per segment langs de Nederlandse kust, voor de zichtjaren 2100 en 2150. Het profiel Kijkduin - Katwijk ligt in hetzelfde gebied waarvoor ook het 3D Dunea model is opgesteld. De berekende volumes van de zoete grondwatervoorraden in beide modellen hebben dezelfde orde grootte: 1070 Mm<sup>3</sup> in het 2D zoet-zout profiel model en 1057 Mm<sup>3</sup> in het 3D Dunea model.

Voor het zichtjaar 2100 behouden alle zoetwaterlenzen nog enigszins hun vorm; alleen het zoetwatervolume in kleine lenzen (profielen A en C) neemt af, maar hier wordt toch maar marginaal zoet grondwater uit onttrokken. Voor het zichtjaar 2150, waarbij de zeespiegel 3.0 m is gestegen, laten de conceptuele 2D modellen zien dat de zoete grondwatervoorraden van de kleinere zoetwaterlenzen in met name de profielen A. Hoek van Holland - Kijkduin, C. Katwijk - Noordwijkerhout en in mindere mate G. Hondsbossche Zeewering - Den-Helder in 2150 flink af te zijn genomen. Figuur 28 toont de zoet-brak-zout verdeling per 2D zoet-zout profiel model voor de jaren 2020 en 2150.

Tabel 9: Schatting van de verandering in zoete grondwatervoorraden in de duinen langs de Hollandse kust en op de Waddeneilanden. De zoetwatervolume schattingen komen uit het 2D profiel per strekkende meter vermenigvuldigd met de lengte van het profiel langs de kust (grondwateraanvulling is 0.8 mm/dag). Twee zichtwaarden: 2100 met een zeespiegelstijging van ~1.35 m en 2150 met een zeespiegelstijging van 3.0 m. Voor de Waddeneilanden zijn voor zichtwaarde 2100 meerdere systemen gemodelleerd waarbij de maaiveldhoogten variëren. De maaiveldhoogte heeft grote invloed op het al dan niet behouden van een zoetwaterlens (zie Figuur 30, en ook Figuur 2 op pagina 12); meerdere waarden zijn mogelijk, afhankelijk van de maaiveldhoogte.

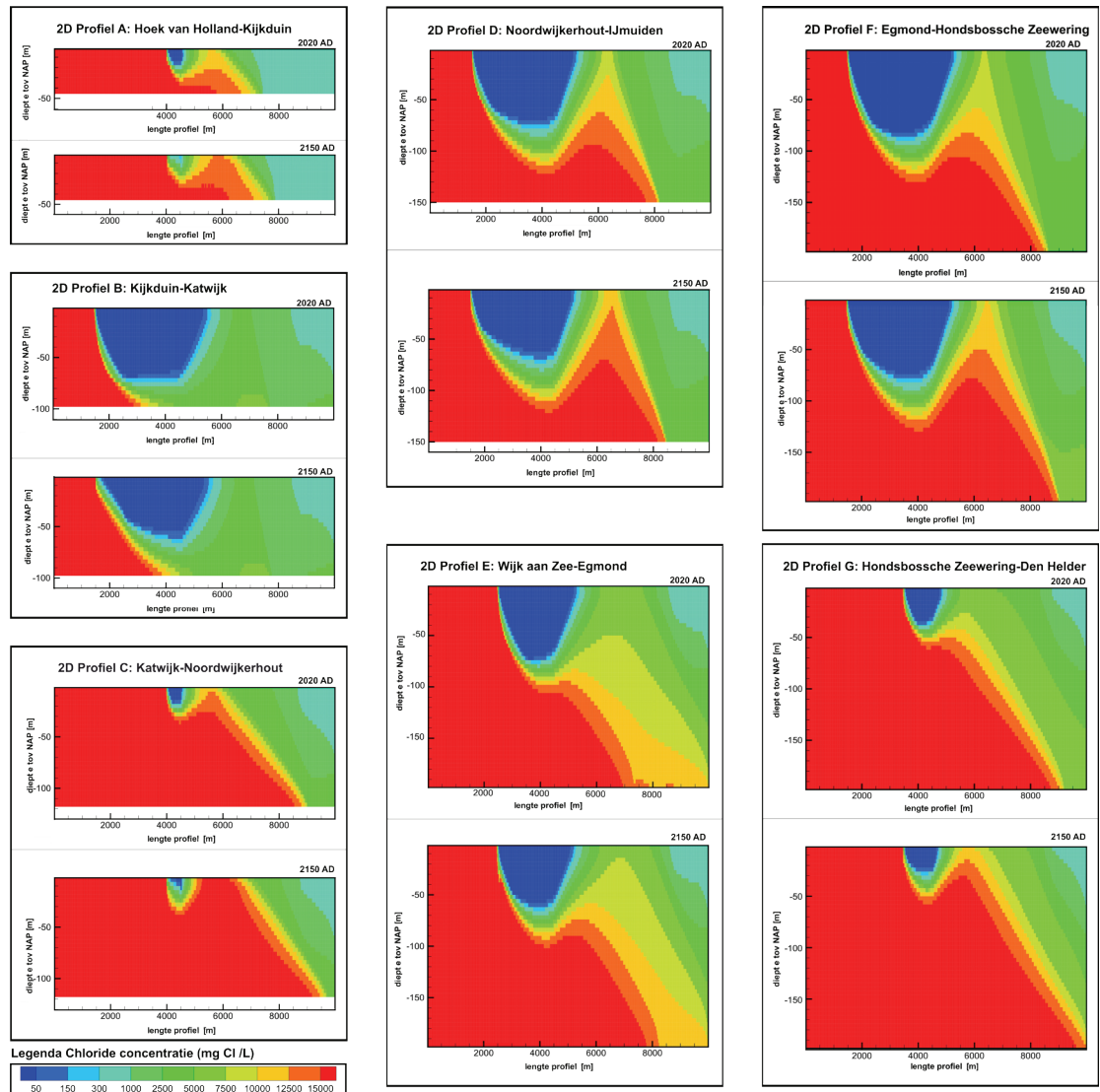
Segment langs de Nederlandse kust	Lengte profiel langs de kust (km)	Grove schatting huidig zoetwatervolume (miljoen m <sup>3</sup> )	Overgebleven volume, in 2100 (%)	Overgebleven volume, in 2150 (%)
A. Hoek van Holland-Kijkduin	15	35	63%	6%
B. Kijkduin-Katwijk	15	1070	86%	74%
C. Katwijk-Noordwijkerhout	12.5	30	77%	45%
D. Noordwijkerhout-IJmuiden	17.5	1150	97%	90%
E. Wijk aan Zee-Egmond	17.5	810	93%	83%
F. Egmond-Hondsbossche Zeewering	12.5	945	96%	90%
G. Hondsbossche Zeewering-Den Helder	22.5	250	87%	70%
H. Terschelling	17.5	350	95%	89-11%
I. Ameland	12.5	115	91%	83-0%

Uit Tabel 9 en Figuur 29 blijkt dat de zoetwatervoorraden van Waddeneilanden (profielen H en I) kwetsbaar zijn voor een grote zeespiegelstijging. Aan beide zijden van de eilanden neemt de druk in het grondwatersysteem met een zeespiegelstijging toe, waarbij de lens als het ware wordt opgetild (zie Figuur 30, en Figuur 2, pagina 12). Bij een oplopende zeespiegelstijging en de daarmee gepaard gaande stijging van de stijghoogte wordt vervolgens de maaiveldhoogte cruciaal. Als de stijghoogte van de zoetwaterlens boven het maaiveld uitkomt, stroomt regenwater af als oppervlakte drainage in plaats van dat het infiltreert, en vindt geen grondwateraanvulling meer plaats (Figuur 2, pagina 12). Wanneer de stijghoogte van de zoetwaterlens niet meer kan meestijgen met de zeespiegel, neemt de dikte en dus het zoetwatervolume van de lens gestaag af. Hoe lager het maaiveld, hoe groter de kans dat de lens sneller verdwijnt. Maar vóór het zichtjaar 2100 komt de stijghoogte waarschijnlijk nog niet in de buurt van het maaiveld.

Voor de conceptuele modellen van de Waddeneilanden wordt in Figuur 29 het effect getoond van verschillende maaiveldhoogten bij een zeespiegelstijging van 3.0 m in het zichtjaar 2150. Het effect op het zoetwatervolume blijft beperkt als de maaiveldhoogte hoog genoeg is om de lens verticaal omhoog te laten bewegen. Pas na het zichtjaar 2100 wordt de maaiveldhoogte steeds relevanter omdat over de volle breedte de grondwaterstand in de zoetwaterlens het maaiveld op meerdere plekken begint te naderen. Bij een gesimuleerde maaiveldhoogte van maximaal 3.5 m NAP en aflopend tot maximaal 2.5 m NAP neemt het zoetwatervolume in de modelberekeningen in de lens gestaag af. In werkelijkheid varieert de maaiveld in het duingebied van de Waddeneilanden (<https://viewer.ahn.nl/>). Het maaiveld is vaak veel hoger dan 3.5 m NAP, maar er zijn ook gebieden waar het maaiveld maximaal 3 m NAP is en juist die gebieden dragen bij aan het versneld laten afnemen van het zoetwatervolume.

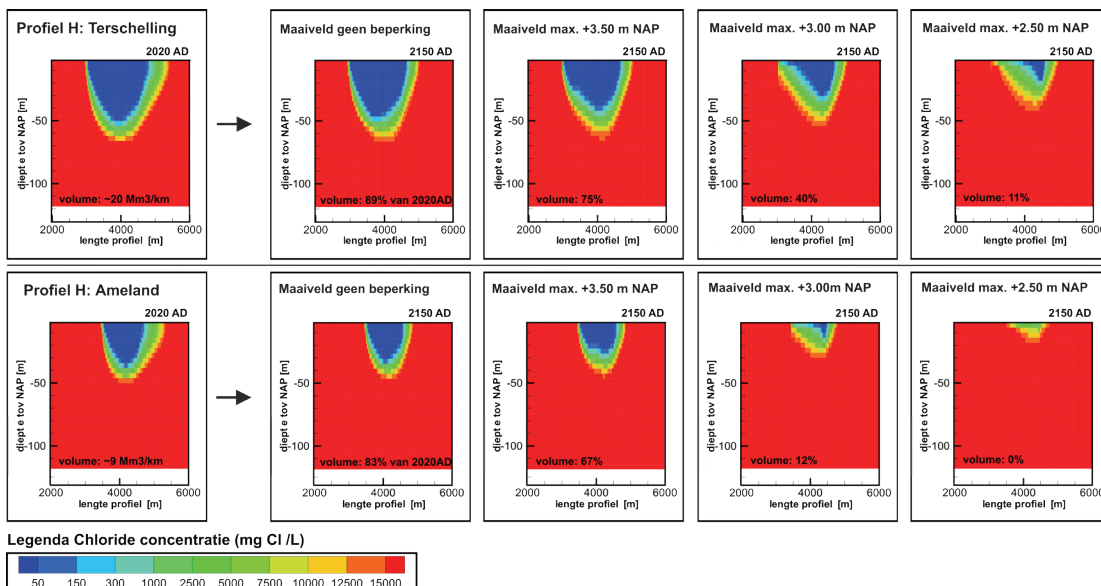
Bijkomende effecten zijn een verschuiving van de waterscheiding in de zoetwaterlens van maximaal enkele honderden meters richting de Noordzee, en met name een zeer sterke toename van de zoutbelasting door meer zoute kwel in de aanpalende polders aan de Waddenkant.

Het effect van een grondwateraanvulling van 0.6 of 0.8 mm/dag is vooral zichtbaar in het absolute zoetwatervolume van de zoetwaterlens. Bij een aanvulling van 0.6 mm/dag is het zoetwatervolume in de lens orde grootte 20-30% kleiner<sup>7</sup>. Het percentage zoetwatervolume dat van dit absolute zoetwatervolume overblijft in de zichtjaren 2100 en 2150 blijft echter vrijwel gelijk, met uitzondering van de kleinste lenzen, die iets kwetsbaarder zijn. De zoutbelasting in de aangrenzende polders in de verschillende profielen kan zowel toe- als afnemen bij een grotere grondwateraanvulling; dit is afhankelijk van zowel de grootte van kwelflux als de zoutconcentratie in de bovenste deel van het grondwatersysteem in de polders.

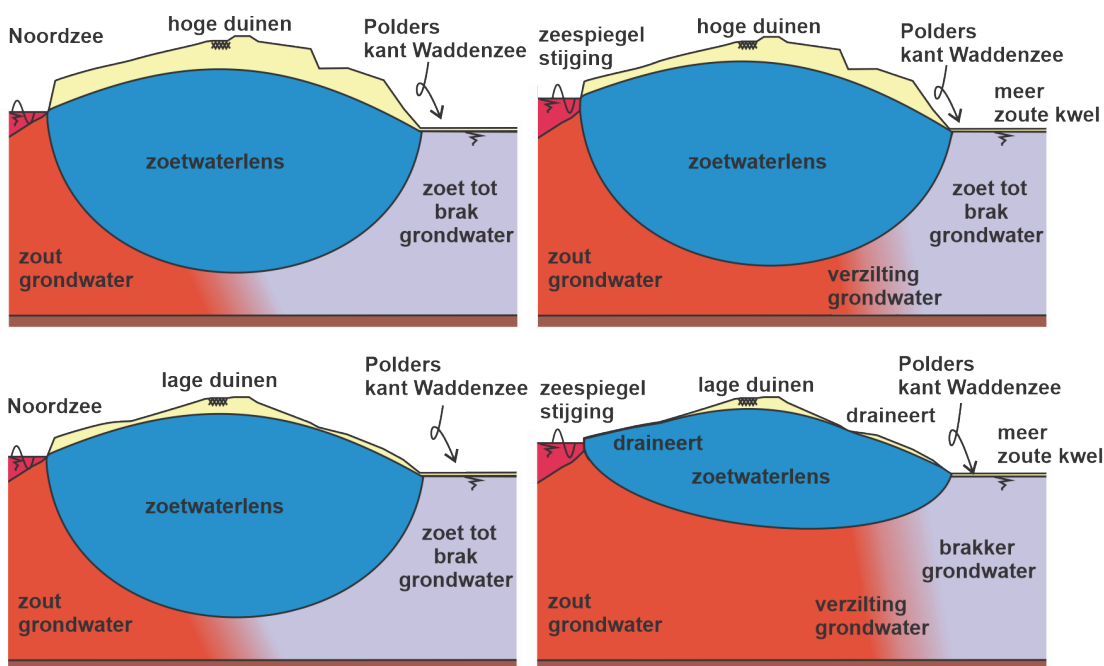


Figuur 28: Zoet-zout verdeling van de zeven 2D zoet-zout profiel modellen langs de Hollandse kust. Per profiel staat boven eerst de referentiesituatie in 2020 en onder laat de invloed zien van een zeespiegelstijging van 3.0 m in het zichtjaar 2150.

<sup>7</sup> Dit is een grotere waarde dan uit de analytische vergelijking komt, omdat ook de achterliggende poldergebieden nog een effect hebben.



Figuur 29: Zoet-zout verdeling van twee profielen H en I in het Waddengebied. Per profiel staat boven eerst de referentiesituatie in 2020 en vervolgens vier profielen met verschillende maximale maaiveldhoogten bij een zeespiegelstijging van 3.0 m in het zichtjaar 2150. Voor de laatste drie profielen rechts is bovenin de maximale hoogte van het maaiveld toegevoegd.



Figuur 30: Schematisaties van twee concepten waarop een zoetwaterlens in het Waddengebied zich kan ontwikkelen onder invloed van een (grote) zeespiegelstijging. Het maaiveld in het duingebied speelt hierbij een cruciale rol. In principe kan een zoetwaterlens meebewegen met een zeespiegelstijging (boven), tenzij het maaiveld zo laag is dat het zoete grondwater uit de lens wegstroomt via drainage en niet bijdraagt aan het behoud van het volume (onder).

## 6 Discussie, conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Discussie

#### 6.1.1 Onzekerheid in gebruikte modellen en invoergegevens

In de gehanteerde methodes zijn verschillende aannames gedaan, die vanzelfsprekend doorwerken op de resultaten. Het belangrijkste onderdeel daarin betreft hoe goed de gebruikte modellen de werkelijkheid kunnen nabootsen. Van belang zijn hydrogeologische parameters, model parameters en scenario's die daarin zijn gebruikt. De twee typen modellen die zijn gebruikt om de mogelijke veranderingen te kwantificeren zijn verschillend van kwaliteit.

Het 3D numerieke model van het duingebied van Dunea bij Den Haag bevat veel lokale hydro(geo)logische invoergegevens (onttrokken uit o.a. een eerder model en het Landelijk Hydrologisch Model), waarbij het grondwateronttrekkingsregime als constant is opgenomen. Het model is gekalibreerd op stijghoogten; daarbij worden diepere stijghoogten door het model beter voorspelt dan de freatische grondwaterstand. Dit lijkt gelieerd te zijn aan de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de grondwateraanvulling die wordt beïnvloedt door neerslag- en verdampingspatronen en het type vegetatie in de duinen. Alhoewel de gemiddelde grondwateraanvulling in het modelgebied aan de lage kant is, lijkt het ter plaatse van het duingebied beduidend hoger te zijn, en wel tot 500 mm/jaar (zie Figuur 33 in Bijlage 8A.1, pagina 61). Een dergelijke grondwateraanvulling is in lijn met recente cijfers voor grondwateraanvulling onder droge graslanden en kale duinbodems (Voortman et al., 2015; 2017). Tegelijk hebben de ruimtelijke en temporele discretisaties van het model (gridcellen van 50 x 50 m<sup>2</sup>, en driemaandelijkse stressperiodes) effect op de gemodelleerde freatische grondwaterstand en grondwateraanvulling (Farías et al. (2024) toont bijvoorbeeld het effect van verschillende gridcelgroottes op de zoet-zout verdeling). De gemodelleerde stijghoogten in het diepere grondwatersysteem komen wel goed overeen met de waarnemingen. Omdat de zoetwatervoorraad van de zoetwaterlens zich met name daar bevindt, blijft het model een goede voorspeller van mogelijke effecten.

De negen 2D zoet-zout profiel modellen langs de Hollandse kust en de eilanden in het Waddengebied zijn conceptueel. De invoerparameters worden als representatief beschouwd voor de gekozen segmenten langs de Nederlandse kust. De in Hoofdstuk 5 besproken modelresultaten gaan uit van een relatief hoge grondwateraanvulling (0,8 mm/dag), maar niet-getoonde modelsimulaties met een lagere grondwateraanvulling (0,6 mm/dag) laten zien dat de procentuele afname van de zoetwaterlens bij een zeespiegelstijging in de zichtjaren 2100 en 2150 vergelijkbaar is. Alleen de kleine zoetwaterlensen bij de profielen A. Hoek van Holland-Kijkduin en C. Katwijk-Noordwijkerhout zijn rond het zichtjaar 2150 significant kleiner bij een lagere grondwateraanvulling.

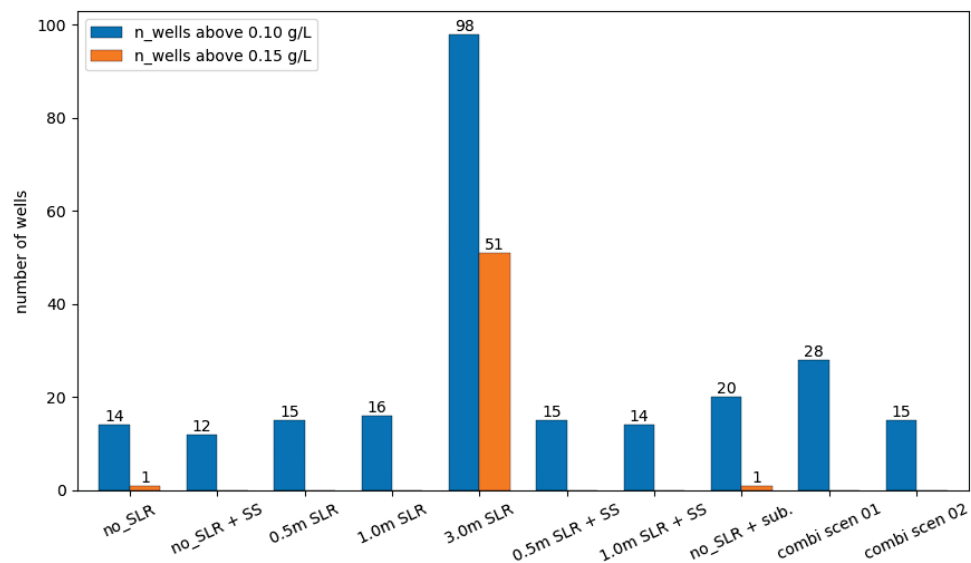
Om inzicht te krijgen in de bandbreedte van de uitkomsten, is gewerkt met verschillende scenario's. Dit omvat onder andere scenario's voor zeespiegelstijging, grondwateraanvulling en de doorlatendheid van de ondergrond. Daarnaast hebben veel hydrogeologische parameters een bandbreedte, zoals de effectieve porositeit van het grondwatersysteem, de interactie met het oppervlaktewatersysteem via intreeweerstanden en de mate van menging van zoet, brak en zout grondwater. De meest waarschijnlijke waarden zijn vastgesteld in eerdere studies, zowel in 3D kwantiteitsmodellen (Landelijk Hydrologisch Model, <https://nhi.nu/>), 3D zoet-zout modellen (Delsman et al., 2023, 2022, 2020; Faneca Sánchez et al., 2012; Oude Essink et al., 2010; Seibert et al., 2024, 2023; Van Baaren et al., 2016b), als in 2D zoet-zout profiel modellen (Delsman et al., 2014; Haasnoot et al., 2018; Oude Essink, 1996). Bovendien hebben deze studies waardevolle informatie opgeleverd over hoe de

complexe interactie tussen oppervlaktewater, de onverzadigde zone en grondwater kan worden gesimuleerd.

### 6.1.2 Analyse zout grondwater in de winputten

Naast het totale effect op het zoetwatervolume in de zoetwaterlens is het ook relevant om te analyseren of winputten, zoals die voor drinkwaterproductie in het Dunea gebied, zullen verzilten onder invloed van verschillende scenario's. Hierbij kan worden gekeken naar chlorideconcentraties boven de drinkwaterdrempel (0.15 g Cl<sup>-</sup>/L) en naar lagere waarden, bijvoorbeeld 0,10 g Cl<sup>-</sup>/L, als indicator dat het grondwater rond de winputten dicht bij de drempelwaarde komt en deze op korte termijn kan overschrijden.

Het 3D model van Dunea is waarschijnlijk te grof om opkegeling van brak en zout grondwater onder een winput nauwkeurig te modelleren (Farías et al., 2024). Daarom is de analyse in deze studie een eerste inschatting, die mogelijk een onderschatting is vanwege het sterk lokale karakter van opkegeling. In Figuur 31 wordt per scenario het aantal winputten boven de norm weergegeven. Dit is gebaseerd op een selectie van ~450 winputten in het Dunea-gebied (zie Tabel 3, pagina 22, voor uitleg van de scenario's).



Figuur 31: Aantal winputten (van in totaal 450) met chlorideconcentraties boven 0.10 g Cl<sup>-</sup>/L en 0.15 g Cl<sup>-</sup>/L (respectievelijk blauwe en oranje balken) in de laatste simulatietijdstep van elk scenario, berekend met het 3D model van Dunea. Alleen het scenario '3.0m SLR' heeft als zichtjaar 2150, de rest het zichtjaar 2100.

In het scenario met een zeespiegelstijging van 3.0 meter trekken bijna 100 winputten grondwater aan met een chlorideconcentratie boven de limiet van 0.10 g Cl<sup>-</sup>/L, en ongeveer 50 winputten met een chlorideconcentratie boven 0.15 g Cl<sup>-</sup>/L. De berekeningen tonen aan dat in het gecombineerde scenario 01 ('combi scen 01'), met 0.5 m zeespiegelstijging, 0.4 m bodemdaling in de poldergebieden en een afname van 3% in grondwateraanvulling, de verzilting van de winputten significant groter is.

### 6.1.3 Compenserende maatregelen

Een veelvoud van maatregelen is waarschijnlijk nodig om het toekomstige tekort aan zoetwater van Nederland op te vangen (Mens et al., 2024). Een stabiele leverantie van zoet water van goede kwaliteit vanuit de duinen vormt daarbij een cruciale pijler. Drinkwater uit de duinen is van hoge kwaliteit en grotendeels vrij van verontreinigingen zoals PFAS. Daarnaast moet de jaarlijkse drinkwaterproductie van Dunea toenemen door bevolkingsgroei en bijbehorende economische activiteiten.

De analytische vergelijkingen (Bijlage 8A.4, pagina 64) tonen aan dat een bredere kuststrook waar neerslag kan infiltreren leidt tot meer grondwateraanvulling en op termijn een grotere zoetwaterlens. Het theoretische volume van zoet grondwater in een zoetwaterlens is namelijk evenredig met het kwadraat van de breedte van het duingebied waar grondwateraanvulling plaatsvindt. Dit geldt, zij het in mindere mate, ook voor extra grondwateraanvulling via kunstmatige infiltratieplassen (Managed Aquifer Recharge, MAR, zie bijv. Dillon et al. (2019) en Sprenger et al. (2017)), waarbij het volume van zoet grondwater theoretisch evenredig is aan de wortel van de grondwateraanvulling. Voor het specifieke duingebied van Dunea, maar waarschijnlijk ook voor andere duingebieden, is intensivering van bestaande MAR systemen aan te bevelen om duurzame ondergrondse waterbergingen te realiseren. Daarnaast biedt een geavanceerd operationeel systeem voor simultane winning van zoet en brak grondwater op robuuste locaties in het wingebied extra waarde. Een pilot in het Dunea gebied heeft de potentie van deze methode aangetoond<sup>8</sup>.

De modelberekeningen, met name het gecombineerde scenario 01 ('combi scen 01'), tonen aan dat het afremmen van bodemdaling in de binnenlandse poldergebieden indirect bijdraagt aan het behoud van het zoetwatervolume in het duingebied van Dunea. Ook extra grondwateraanvulling via MAR systemen heeft een positief effect op het volume.

Ook zandsuppleties voor kustverdediging hebben een positief maar beperkt effect op het volume. Een ietwat bredere duinenstrook waar extra grondwateraanvulling kan plaatsvinden leidt tot een groter zoetwatervolume in de zoetwaterlens maar dit effect lijkt niet groot. Tot 2100 is de afname van het zoetwatervolume een paar miljoen m<sup>3</sup> zoet grondwater minder, bij zowel een zeespiegelstijging van 0.5 m of 1.0 m (Tabel 6, pagina 38). Als een zandsuppletie zou worden gecombineerd met bredere duinen, dan is de toename in volume relevant. Pas bij een grote zeespiegelstijging, na richtjaar 2100, wordt de maaiveldhoogte waarschijnlijk een belangrijke factor. Wanneer de grondwaterstand het maaiveld gaat raken, wordt grondwateraanvulling afgevangen en neemt daarmee de diepte van de lens af (Figuur 30, pagina 48). De analyses van de 2D conceptuele modellen laten zien dat bij een grote zeespiegelstijging het volume sterk afhangt van de maaiveldhoogte. Zandsuppleties die leiden tot een bredere kuststrook zullen bijdragen aan een robuuster systeem. In deze studie is dit onderdeel niet verder onderzocht.

In alle conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen neemt de zoutbelasting in de achterliggende gebieden flink toe; de zoetwaterlensen worden kleiner en de zoute kwel neemt toe. Deze studie bevestigt het beeld dat in Delsman et al. (2022) is geschetst: een stijgende zeespiegel leidt tot een extra verzilting van het grondwatersysteem en de zoutvracht in de poldergebieden neemt extra toe, bovenop de autonome verzilting die plaatsvindt. Onder de aanname dat de huidige chlorideconcentraties in het regionale oppervlaktewater gehandhaafd blijven, zou dat leiden tot een grotere doorspoelwater vraag omdat bij een toenemende zoutvracht meer doorspoeling van zoet water nodig is om eenzelfde chlorideconcentratie te handhaven. Bovendien laten Mens et al. (2024) in de rapportage 'De zoetwaterbalans van laag Nederland in een warmer klimaat' zien dat het watertekort tijdens extreme droogte flink toe zal nemen als het klimaat verder opwarmt, neerslagtekort toeneemt, de zeespiegel verder stijgt en de rivierafvoeren afnemen, wanneer dezelfde eisen worden gesteld aan de waterkwaliteit als nu.

Een hogere zoutbelasting in de poldergebieden vraagt om een toename van de doorspoelwater vraag, en in bepaalde delen om ander landgebruik (zoals droogte- en zoutresistente gewassen (Negacz et al., 2021). Uiteindelijk zijn ook andere (indirecte)

-----  
<sup>8</sup> <https://www.deltares.nl/verhalen/samen-werken-aan-meer-drinkwater>

maatregelen nodig zoals huishoudelijk en industriële waterbesparing, en hergebruik van afvalwater.

## 6.2 Conclusies

De numerieke modellen zijn in staat gebleken inzicht te geven in de effecten van verschillende factoren in het duingebied die kunnen bijdragen aan de verandering van het zoetwatervolume in de zoetwaterlenzen in de kuststrook. De focus lag in deze studie op de verschillende scenario's van zeespiegelstijging, maar ook het effect van (een combinatie van) andere factoren. Expliciet zijn dat zandsuppleties, een verandering in grondwateraanvulling (als een functie van de verandering in neerslag- en verdampingspatronen en het type vegetatie in de duinen), bodemdaling in het achterliggende poldergebied, de mate waarin regenwater wordt afgevangen voordat het infiltreert in de ondergrond, en variaties in de geologie. De onderlinge verhoudingen tussen de factoren zijn duidelijker geworden.

Betreffende het duingebied van Dunea: het 3D model toont dat zelfs zonder een zeespiegelstijging het volume van de zoetwaterlens van het Dunea gebied nog steeds iets afneemt, omdat het autonome verziltingproces in deze regio met een laaggelegen achterland nog steeds niet is uitgewerkt. Dit proces speelt ook in andere laaggeleden kustgebieden, zoals in noordwest Duitsland (Seibert et al., 2024). Bij de twee scenario's met respectievelijk een zeespiegelstijging van 0.5 m en 1.0 m in het zichtjaar 2100 zijn de zoete grondwatervoorraden in het Dunea gebied in beperkte mate aangetast. De zoetwaterlens zal respectievelijk ~4% en ~6% in volume afnemen. Voor de decennia na 2100, in het scenario bij een zeespiegelstijging van 3.0 m in het zichtjaar 2150, lijkt het erop dat de zoetwaterlens versneld in volume zal afnemen. In het zuidwestelijk deel van het gebied zal meer verzilting optreden; het grensvlak tussen zoet en zout grondwater stijgt daar het meest. In dit scenario is de impact het grootst en kan door de versnelde verzilting een vermindering van de zoetwatervoorraad tot bijna 34% optreden. De respons van de zoetwaterlens op veranderingen in de natuurlijke grondwateraanvulling is kleiner dan op basis van analytische vergelijkingen verwacht mag worden. Dit verschil kan worden verklaard door het dempende effect van de kunstmatige grondwateraanvulling vanuit de infiltratieplassen. Meer natuurlijke aanvulling resulteert in minder kunstmatige aanvulling, en vice versa.

Voor de conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen is alleen het scenario doorgerekend van een zeespiegelstijging van 3.0 m in het zichtjaar 2150, hetgeen een zeespiegelstijging van 1.35 m betekent voor het zichtjaar 2100. Zoetwatervolumes in de duingebieden langs de Hollandse kust en op de Waddeneilanden worden op termijn sterk beïnvloed door een zeespiegelstijging. Tot het zichtjaar 2100 (met een zeespiegelstijging van 1.35 m) blijven de meeste zoetwaterlenzen grotendeels intact, alhoewel de kleinere lenzen, zoals bij het segment Hoek van Holland en Katwijk, een afname tonen en het overgebleven volume 63% bedraagt. Tegen 2150 neemt het zoetwatervolume van alle kleine lenzen in de segmenten Hoek van Holland - Kijkduin, Wassenaar - Katwijk en in mindere mate Hondsbossche Zeewering - Den-Helder aanzienlijk af bij een zeespiegelstijging van 3.0 m. Bovendien zijn vooral de Waddeneilanden kwetsbaar; het volume zoetwater varieert sterk. In de mate van afname van het zoetwatervolume is de maaiveldhoogte cruciaal: wanneer het maaiveld onvoldoende hoog is, en als de stijghoogte van de zoetwaterlens boven het maaiveld uitkomt, dan stopt de grondwateraanvulling omdat regenwater voornamelijk zal afstromen via het oppervlakte drainage in plaats van dat het infiltreert. Het volume van de zoetwaterlens neemt dan gestaag af. Dit effect wordt na 2100 sterker naarmate het maaiveld lager is. Bij een grondwateraanvulling van 0.6 mm/dag is de zoetwaterlens circa 20% kleiner dan bij 0.8 mm/dag. De afname van dit zoetwatervolume in 2100 en 2150 ten opzichte van 2020 blijft procentueel evenwel vrijwel gelijk. Alleen de kleinste lenzen zijn iets kwetsbaarder. Grotere aanvulling leidt bovendien tot meer zoutbelasting in aangrenzende polders in het binnenland.

Zandsuppleties conform de voorkeursstrategie voor waterveiligheid voor de zandige kust, waarbij het kustfundament in evenwicht wordt gehouden door het suppleren van het strand en de zeereep in hetzelfde tempo als de zeespiegelstijging, kunnen de effecten van zeespiegelstijging op het zoetwatervolumen van de zoetwaterlens (zeer) beperkt verminderen (~0.5% minder volume afname). Het deel van de vooroever, strand en duinen die meegroeien met de zeespiegelstijging is beperkt ten opzichte van het gehele achterliggende gebied waar zeespiegelstijging invloed heeft op de zoetwaterlens. Zandsuppleties zouden wel de kans op overstromingen van de vooroever en het strand kunnen verkleinen, met minder verzilting van het bovenste deel van grondwatersysteem tot gevolg (Huizer et al., 2017). Bovendien kan in dit gebied de grondwaterstand hoger zijn, met minder afstroming van potentiële grondwataanvulling tot gevolg.

Bodemdaling in het achterliggende poldergebied en het evenredig meedalen van de polderpeilen (volgens het principe peil volgt functie) beïnvloedt het volume van de zoetwaterlens in negatieve zin (~3% meer volume afname), terwijl het effect van een verandering in grondwataanvulling zeer klein is (~0.5% meer of minder afname, afhankelijk van het klimaatscenario), waarschijnlijk wegens slechtdoorlatende weerstandslagen die infiltratie van water naar het diepe systeem tegenhouden. In het duinsysteem van Dunea beperken kunstmatige infiltratieplassen (MAR systeem) de invloed van veranderingen in directe grondwataanvulling. Het effect op het diepere grondwatersysteem, waar de zoetwaterlens zich uitbreidt, blijft hierdoor gering. Deze veranderingen in grondwataanvulling worden als het ware voortijdig geneutraliseerd.

## 6.3 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen kunnen worden gedaan:

### 6.3.1 Algemene aanbevelingen

- Zeespiegelstijging heeft via verzilting van het grondwater en daarmee samenhangende watervraag een duidelijke impact op het Nederlandse zoetwaterbeheer, en de drinkwatervoorziening in het kustgebied in het bijzonder. Verzilting van het grondwater dient dan ook een belangrijk aandachtspunt te zijn in verder onderzoek naar de effecten van zeespiegelstijging op het Nederlandse waterbeheer (Delsman et al., 2022; Mens et al., 2024).
- Het zoete grondwater in de Nederlandse duinen wordt beïnvloed door meer dan alleen een zeespiegelstijging. Het verdient aanbeveling de effecten van verschillende factoren gecombineerd en integraal te analyseren, en breder dan alleen het zoetwatervolume in de zoetwaterlens zoals bijvoorbeeld het ecologische systeem. Het gaat om een combinatie van factoren zoals zeespiegelstijging, bodemdaling in de poldergebieden, zandsuppleties, grondwateronttrekkingen die toe zullen nemen, duinverbredingen (Huizer et al., 2016) en lokale landaanwinningen, alsmede kunstmatige infiltraties via Managed Aquifer Recharge (MAR) systemen.
- Een deel van het zoete grondwater dat in de Nederlandse duingebieden is opgeslagen is grondwater van zeer goede kwaliteit, zonder verontreinigingen en is geïnfiltreerd over lange tijdsperiodes van minimaal vele tientallen tot honderden jaren (Vos, 2015). Het zijn diep gelegen, zeer oude en schone grondwatervoorraden, die eeuwenlang goed bewaard zijn gebleven. Als zodanig zou het kunnen behoren tot de Nationale Grondwater Reserves (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2021; Nijsten et al., 2022), maar dat is op dit moment nog niet het geval. Gegeven de vele factoren die deze zoete voorraden beïnvloeden, en met name de actieve kunstmatige infiltraties via MAR systemen sinds eind van de jaren '50 van de vorige eeuw, verdient het aanbeveling deze voorraden op een verstandige en duurzame manier te beheren binnen het kader van de Nationale Grondwater Reserves.

- Het verdient aanbeveling niet alleen te kijken naar het zoete grondwaterdeel in de Nederlandse duinen met chlorideconcentraties onder de drinkwaterdrempel (0.15 g Cl<sup>-</sup>/L) omdat licht brak tot brak grondwater, dat in grotere hoeveelheden dan zoet grondwater voorkomt in het kustgebied, in de toekomst nog steeds nuttig kan zijn, al dan niet in een (lichte) ontzilte vorm voorbij de toepasbaarheid voor zoetwaterlandbouw (Negacz et al., 2022).

### 6.3.2 Voor verder onderzoek en modelontwikkeling

- Verbetering van het niet-stationaire 3D model van Dunea. Het huidige model werd eerder alleen gekalibreerd aan de hand van lange termijn gemiddelden van waargenomen stijghoogten uit een aantal putten en op basis van een vergelijking van waterbalansen en begrotingen. Het is noodzakelijk om het numerieke model te verfijnen (zeker als opkegeling van brak tot zout grondwater moet worden gemodelleerd) en verder te kalibreren onder niet-stationaire omstandigheden. Het huidige model vertoont behoorlijke verschillen met de waargenomen tijdreeksen in een aantal putten, wat duidt op een lagere nauwkeurigheid van het model bij het weergeven van lokale processen. Gezien de totale omvang van het model, de celgrootte en het aantal modellen, is het te verwachten dat er enige mismatch zal blijven optreden. Voor nauwkeurigere resultaten wordt echter aanbevolen om deze tijdreeksen op te nemen in een volgende modelkalibratie.
- Verbetering van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de grondwateraanvulling. Hier komen een aantal facetten samen:
  - De aanvulling wordt beïnvloed door variabele neerslag- en verdampingspatronen (ook onderhevig aan veranderingen in de toekomst) en het type vegetatie in de duinen. Het model is niet goed in staat de freatische grondwaterstanden na te bootsen en dit is mogelijk gelieerd aan de grondwateraanvulling.
  - Een deel van de grondwateraanvulling dat het freatische watervoerende pakket binnendringt in de duinen infiltreert naar de diepere watervoerende pakketten waar het volume van de zoetwaterlens wordt aangevuld. De mate waarin hangt af van de hydraulische weerstand van de slechtdoorlatende weerstandlagen. Een verbetering van de hydraulische weerstanden van de lagen zou bijdragen aan de kwaliteit van het model.
  - Er is behoefte aan nieuwe MetaSwap resultaten voor de ontwikkeling van toekomstige klimaatscenario's voor grondwateraanvulling. Omdat projecties van de grondwateraanvulling niet de volledige simulatieperiode (tot 2150) bestrijken, zijn de resultaten van 2050-2080 uitgebreid naar 2150 om deze beperking te ondervangen. Ook zijn vereenvoudigde trends toegepast op deze waarden om toenemende/afnemende aanvulling in sommige scenario's te simuleren, wat kan verschillen van modelberekeningen die rekening houden met verwachte neerslag en verdampingsprocessen. Er wordt aanbevolen om deze resultaten op te nemen in toekomstige modelberekeningen wanneer ze beschikbaar zijn. Desondanks is de hier gebruikte aanpak nog steeds inzichtelijk en geeft het waarschijnlijke toenemende / afnemende grondwateraanvullingen in het kuststelsel.
  - Er is voor alle scenario's over de gehele simulatieperiode één grondwateronttrekkingsregime en één systeem van infiltratie en plassen Managed Aquifer Recharge (MAR) systeem opgelegd. Dit zal in de toekomst waarschijnlijk anders zijn, gegeven vraagstukken rondom overbruggingsvermogen en toenemende watervraag in het voorzieningsgebied van Dunea.
- Om inzicht te krijgen in de bandbreedtes van de modeluitkomsten zouden andere waarden voor de conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen moeten worden

doorgerekend, zoals de hydrogeologische parameters voor de dikte van het watervoerend pakket, de breedte van de zoutwaterlens, gemiddelde polderpeilen in het binnenland, en de hydraulische weerstand van de deklaag.

### 6.3.3 **Specifiek voor vervolgberekeningen binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging**

- Analyse van het effect van (onvoldoende) maaiveldhoogte op de vorming van zoetwaterlens en zoutbelasting in de poldergebieden achter de duinen bij verschillende scenario's.
- Gebruik 3D modellen in plaats van conceptuele 2D zoet-zout profiel modellen ter plaatse van de andere segmenten langs de Hollandse kust en het Waddengebied om gecombineerde effecten en de relatie tot het effect van een zeespiegelstijging te bepalen.
- Analyse van het effect van verschillende compenserende maatregelen op het zoetwatervolume van de zoetwaterlenzen, zoals extra grondwateraanvulling door middel van intensivering van Managed Aquifer Recharge systemen of brakwater winningen.
- Analyse van de opkegeling van brak en zout grondwater in de winputten in het duingebied die bijdragen aan de productie van zoet drinkwater uit grondwater, onder verschillende scenario's. Naarmate de zeespiegel verder stijgt, wordt een groter aantal winputten bedreigd, maar welke, wanneer en hoe ernstig en het effect daarvan op de totale zoete grondwaterproductie is vooralsnog onduidelijk.
- Analyses van de zoutbelasting in (dalende) laaggelegen poldergebieden direct achter de duinen en effect daarvan op de doorspoelbehoefte met zoetwater (Delsman et al., 2022).
- Analyse van het effect van een zeespiegelstijging op de natuur en ecologie in de duingebieden (met name ter plaatse van de NATURA2000-gebieden).

## 7 Referenties

- Bakker, M., Oude Essink, G.H.P., Langevin, C.D., 2004. The rotating movement of three immiscible fluids - a benchmark problem. *J. Hydrol.* 287, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.10.007>
- Boekelman, R.H., 1998. Ontwikkeling van een zoetwaterlens in een cirkelvormig eiland.
- Boonekamp, T., Boleij, J., Huizer, S., Zuurbier, K.G., Oude Essink, G.H.P., Janssen, G.M.C.M., 2019. Vergroten overbruggingsvermogen naar een robuuste strategische zoetwatervoorraad. Arcadis Rapp. 083775184 A.
- Boonekamp, T., Huizer, S., Bootsma, H., 2021. COASTAR case A2: Brakwaterwinning kust; voorstudie en aanzet tot pilot voor toepassing brakwater als derde drinkwaterbron. Tki-Wt Coastar, D10020362.100 75.
- Burgering-Bos, L.M.T., Buijs, S., America, I., Klooster, J., De Louw, P.G.B., Delsman, J.R., Stofberg, S.F., Raat, K.J., Franssen, R., Posma, J., 2021. COASTAR Regionale en nationale opschaling, Deltares rapport 11204487-001-BGS-0005.
- Cantelon, J.A., Guimond, J.A., Robinson, C.E., Michael, H.A., Kurylyk, B.L., 2023. Vertical saltwater intrusion in coastal aquifers driven by episodic flooding: A review. *Water Resour. Res.* 58, 1–25. <https://doi.org/10.1029/2022WR032614>
- Cirkel, D.G., Aggenbach, C.J.S., 2024. Gevolgen zeespiegelstijging en klimaatverandering op zoetwaterbel en duinvalleien - Literatuurstudie, KWR rapport - KWR 2024.073.
- De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Delsman, J.R., Van Baaren, E.S., America, I., Van Engelen, J., 2019. Het langetermijngeheugen van de zoet-zoutverdeling. *Stromingen* 33, 43–60.
- Delsman, J.R., America, I., Mulder, T., 2022. Grondwaterverziltting en watervraag bij een stijgende zeespiegel; Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II. Deltares Rapp. 11208039-009-BGS-0001 89.
- Delsman, J.R., Hu-a-ng, K.R.M., Vos, P.C., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Stuyfzand, P.J., Bierkens, M.F.P., 2014. Paleo-modeling of coastal saltwater intrusion during the Holocene: An application to the Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3891–3905. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3891-2014>
- Delsman, J.R., Mulder, T., Verastegui, B.R., 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. *Environ. Model. Softw.* 105683. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105683>
- Delsman, J.R., Oude Essink, G.H.P., Huizer, S., Bootsma, H., Mulder, T., Zitman, P., Romero Verástegui, B.D., 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.S., 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, 12.

- Dillon, P.J., Stuyfzand, P.J., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R.D.G., Jain, R.C.C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., Van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B.R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Shamruk, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Valverde, J.P.B., Nava, A.P., Ansems, N., Posavec, K., Ha, K., Martin, R., Sapiano, M., 2019. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeol. J.* 27, 1–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>
- Drabbe, J., Badon Ghijben, W., 1889. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. *Tijdschr. Van K. Inst. Van Ingenieurs* 5, 8–22.
- Dunea, 2022. 2022 Annual report - Accelerating for dunes and water.
- Faneca Sánchez, M., Gunnink, J.L., Van Baaren, E.S., Oude Essink, G.H.P., Siemon, B., Auken, E., Elderhorst, W., De Louw, P.G.B., 2012. Modelling climate change effects on a Dutch coastal groundwater system using airborne electromagnetic measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 4499–4516. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4499-2012>
- Farías, I., Oude Essink, G.H.P., De Louw, P.G.B., Bierkens, M.F.P., 2024. Effects of grid resolution on regional modelled groundwater salinity and salt fluxes to surface water. *J. Hydrol.* 643, 131915. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131915>
- Haasnoot, M., Bouwer, L.M., Diermanse, F., Kwadijk, J.C.J., Van der Spek, A.J.F., Oude Essink, G.H.P., Delsman, J.R., Weiler, O., Mens, M.J.P., Ter Maat, J., Van der Kaaij, T., Plioger, R., Huismans, Y., Sloff, K., Mosselman, E., Lenselink, G., Spek, A. van der, 2018. Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma - een verkenning, Deltares rapport 11202230-005-0002.
- Harbaugh, A.W., 2006. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/tm6A16>
- Herzberg, B., 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *J. für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung* 44, 815–819.
- Huizer, S., 2024. Overbrugging en brakwaterwinning - Volhoudbare strategische watervoorraad. Arcadis Rapp. 3W54MDYSSJCE-222884776-441.4 86.
- Huizer, S., 2020. Onderzoeksproject overbruggingsvermogen - Deelrapport Berkheide, Arcadis rapport D10010791:68.
- Huizer, S., Karaoulis, M.C., Oude Essink, G.H.P., Bierkens, M.F.P., 2017. Monitoring and simulation of salinity changes in response to tide and storm surges in a sandy coastal aquifer system. *Water Resour. Res.* 53, 6487–6509. <https://doi.org/10.1002/2016WR020339>
- Huizer, S., Oude Essink, G.H.P., Bierkens, M.F.P., 2016. Fresh groundwater resources in a large sand replenishment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 3149–3166. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3149-2016>
- IJff, S., Maarse, M., Delsman, J.R., 2020. Memo toekomst duinen. Deltares memo 11206870-036.
- Ingebritsen, S.E., Galloway, D.L., 2014. Coastal subsidence and relative sea level rise. *Environ. Res. Lett.* 9, 091002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/091002>

- KNMI, 2023. KNMI'23 Klimaatscenario's voor Nederland, KNMI publication-23-03.
- Langevin, C.D., Thorne, D.T.J., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W., 2008. SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport, U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6.
- Mens, M.J.P., Pouwels, J., Weiler, O., Delsman, J.R., Huismans, Y., 2024. De zoetwaterbalans van laag Nederland in een warmer klimaat. Deltares Rep. 11210362-000-ZWS-0001 35.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2021. Beleidsnota Drinkwater 2021-2026 - Samen werken aan een toekomstbestendige drinkwatervoorziening.
- Negacz, K., Malek, Z., de Vos, A., Vellinga, P., Malek, Ž., de Vos, A., Vellinga, P., 2022. Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture. J. Arid Environ. 203. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104775>
- Negacz, K., Vellinga, P., Barrett-Lennard, E., Choukr-Allah, R., Elzenga, J.T.M., 2021. Future of Sustainable Agriculture in Saline Environments. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003112327>
- Nicholls, R.J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A.T., Meyssignac, B., Hanson, S.E., Merkens, J.-L., Fang, J., 2021. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. Nat. Clim. Chang. 45, 634. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>
- Nijsten, G.-J., Mulder, N., Davids, T., Vermooten, S., Van der Brugge, R., Leerdam, R. van, 2022. Nationale Grondwater Reserves (NGR) - Onderbouwing van noodzaak voor aanwijzing en mogelijke omvang, Deltares rapport 11207416-002-BGS-0007.
- Oude Essink, G.H.P., 2001. Density dependent groundwater flow: Salt water intrusion and heat transport 137.
- Oude Essink, G.H.P., 1996. Impact of sea level rise on groundwater flow regimes; A sensitivity analysis for the Netherlands. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Oude Essink, G.H.P., Forzoni, A., 2018. Actualisatie zoet-zout verdeling in watervoerende pakketten in Zuid-Holland, Deltares-rapport 11200066.
- Oude Essink, G.H.P., van Baaren, E.S., De Louw, P.G.B., 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. Water Resour. Res. 46, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2009WR008719>
- Paldor, A., Michael, H.A., 2021. Storm surges cause simultaneous salinization and freshening of coastal aquifers, exacerbated by climate change. Water Resour. Res. 57, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2020WR029213>
- Philip, S.Y., Kew, S.F., Van der Wiel, K., Wanders, N., Van Oldenborgh, G.J., Philip, S.Y., 2020. Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. Environ. Res. Lett. 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab97ca>
- Post, V.E.A., Groen, J., Kooi, H., Person, M., Ge, S., Edmunds, W.M., 2013. Offshore fresh groundwater reserves as a global phenomenon. Nature 504, 71–8. <https://doi.org/10.1038/nature12858>
- Post, V.E.A., Houben, G.J., Van Engelen, J., 2018. What is the Ghijben-Herzberg principle

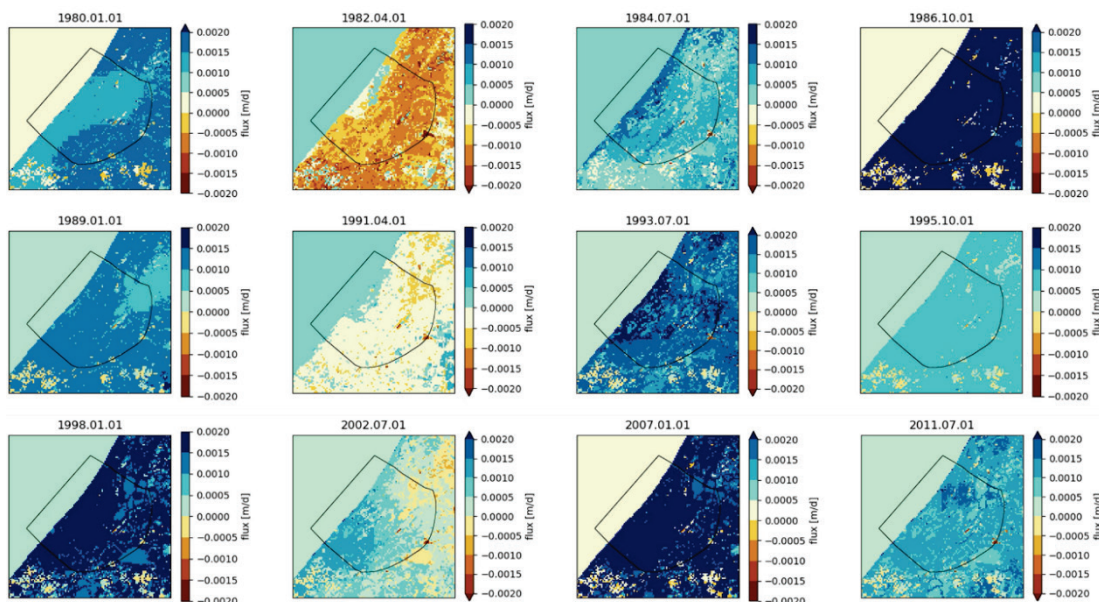
and who formulated it? Hydrogeol. J. 26.

- Santing, G., 1980. Een probleem bij de stroming van zoet en zout grondwater: de correcties op de stijghoogten. H2O 13, 544–548.
- Seibert, S.L., Greskowiak, J., Bungenstock, F., Freund, H., Karle, M., Meyer, R., Oude Essink, G.H.P., Van Engelen, J., Massmann, G., 2023. Paleo-hydrogeological modeling to understand present-day groundwater salinities in a low-lying coastal groundwater system (Northwestern Germany). *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1029/2022WR033151>
- Seibert, S.L., Greskowiak, J., Oude Essink, G.H.P., Massmann, G., 2024. Understanding climate change and anthropogenic impacts on the salinization of low-lying coastal groundwater systems. *Earth's Futur.* 12. <https://doi.org/10.1029/2024EF004737>
- Sluijter, R., Plieger, M., Van Oldenborgh, G.J., Beersma, J.J., De Vries, H., 2018. Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort, KNMI publicatie 117162.
- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F., Hannappel, S., 2017. Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeol. J.* 25, 1909–1922. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8>
- Stuyfzand, P.J., 1993. Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Taniguchi, M., 2002. Tidal effects on submarine groundwater discharge into the ocean. *Geophys. Res. Lett.* 29, 1561. <https://doi.org/10.1029/2002GL014987>
- Taniguchi, M., Dulai, H., Burnett, K.M., Santos, I.R., Sugimoto, R., Stieglitz, T., Kim, G., Moosdorf, N., 2019. Submarine Groundwater Discharge: Updates on its measurement techniques, geophysical drivers, magnitudes, and effects. *Front. Environ. Sci.* 7, 1–26. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00141>
- Van Baaren, E.S., Delsman, J.R., Pauw, P.S., Karaoulis, M.C., Dabekaussen, W., Gunnink, J.L., Siemon, B., 2016a. FRESHM Kanaalzone Gent-Terneuzen: 3D zoet-brak-zout kartering van het grondwater, Deltares rapport 1209220.
- Van Baaren, E.S., Oude Essink, G.H.P., Janssen, G.M.C.M., De Louw, P.G.B., Heerdink, R., Goes, B.J.M., 2016b. Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland; Zeeland model: 3D regionaal zoet-zout grondwater, Deltares report 1220185.
- Van Dam, J.C., 1992. Geohydrology, Lecture notes (in Dutch). Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Section Hydrology.
- Van der Hoeven, P.C.T., 2011. Beweging der wateren boven, op, in en onder de Aarde - berekening Makking-verdamping vanuit temperatuurextremen. *Lysimeters Castricum, Wageningen - Alterra* 2053–4.
- Van Vugt, A., Oude Essink, G.H.P., Biesheuvel, A., 2003. Modelling van het zoet – zout grondwatersysteem op Texel. *Stromingen* 9, 33–46.
- Vandenbohede, A., Lebbe, L.C., 2006. Occurrence of salt water above fresh water in dynamic equilibrium in a coastal groundwater flow system near De Panne, Belgium. *Hydrogeol. J.* 14, 462–472. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0446-5>
- Verkaik, J., Huizer, S., Van Engelen, J., Ram, R., Vuik, K., Oude Essink, G.H.P., Engelen, J.

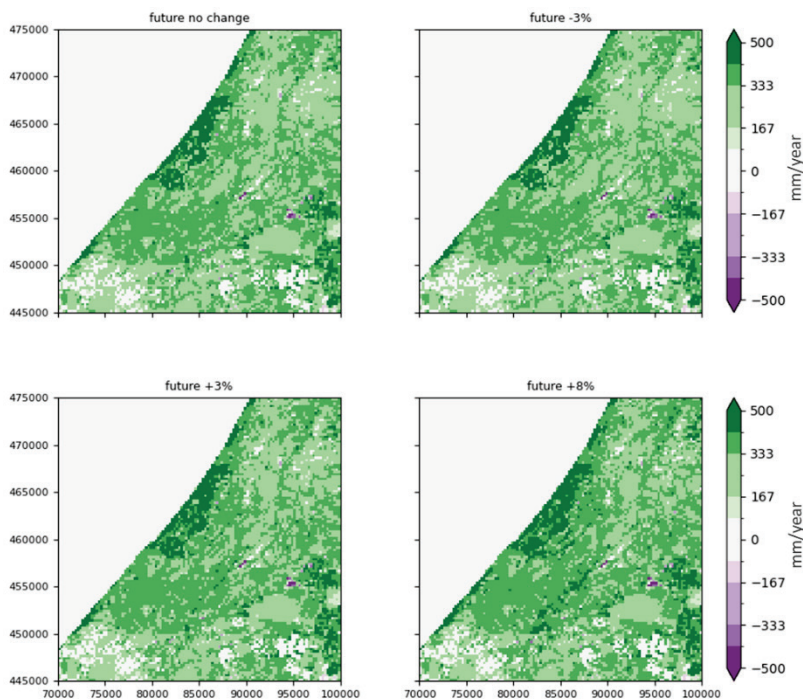
- Van, 2018. Parallel Computing with SEAWAT, in: 25th Salt Water Intrusion Meeting Salt Water Intrusion Meeting. p. 347.
- Vermeulen, P.T.M., Davids, T., Kaandorp, V.P., 2024. Terschelling grondwatermodellering - model beschrijving en validatie. Deltares Rapp. 11207941-005-BGS-001-BGS-001.
- Voortman, B.R., Bartholomeus, R.P., Van der Zee, S.E.A.T.M., Bierkens, M.F.P., Witte, J.-P.M., 2015. Quantifying energy and water fluxes in dry dune ecosystems of the Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 3787–3805. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3787-2015>
- Voortman, B.R., Fujita, Y., Bartholomeus, R.P., Aggenbach, C.J.S., Witte, J.-P.M., 2017. How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation. *Ecohydrology* 10, 1–12. <https://doi.org/10.1002/eco.1848>
- Vos, P.C., 2015. Origin of the Dutch coastal landscapes; Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series. Utrecht University.
- Witte, J.-P.M., Bartholomeus, R.P., Cirkel, D.G., Kamps, P.W.J.T., 2008. Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. KWR Rapp. - KWR 08.006.
- Witte, J.-P.M., Bartholomeus, R.P., Voortman, B.R., Van der Hagen, H., Van der Zee, S.E.A.T.M., 2012. Droge duinvegetatie zeer zuinig met water. *Landschap* 29, 109–118.
- Yang, J., Graf, T., Herold, M., Ptak, T., 2013. Modelling the effects of tides and storm surges on coastal aquifers using a coupled surface-subsurface approach. *J. Contam. Hydrol.* 149, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.03.002>
- Yang, J., Zhang, H., Yu, X., Graf, T., Michael, H.A., 2018. Impact of hydrogeological factors on groundwater salinization due to ocean-surge inundation. *Adv. Water Resour.* 111, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.017>
- Yu, X., Yang, J., Graf, T., Koneshloo, M., Neal, M.A.O., Michael, H.A., 2016. Impact of topography on groundwater salinization due to storm surge inundation. *Water Resour. Res.* 52, 5794–5812. <https://doi.org/doi:10.1002/2016WR018814>

# 8 Bijlagen

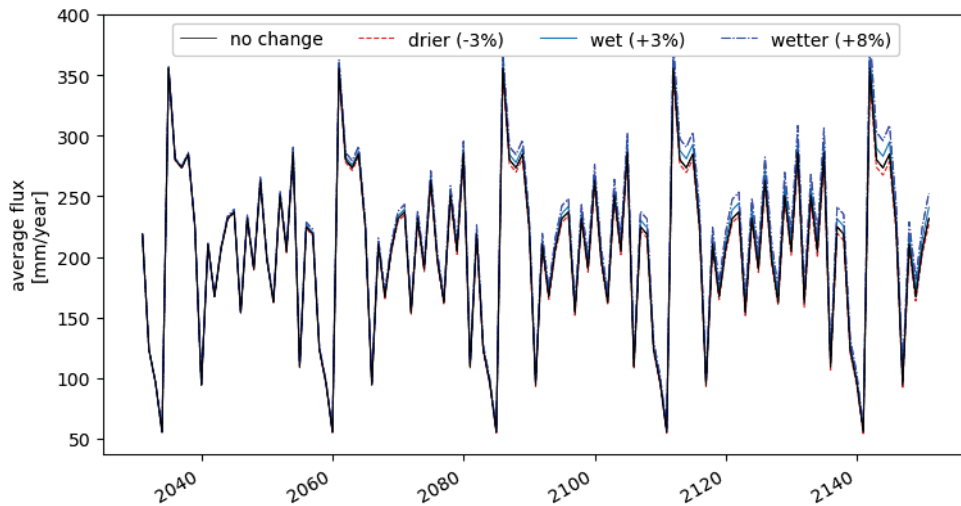
## A.1 Bijlage 1: Voorbeelden van een ruimtelijke verdeling van de grondwateraanvulling



Figuur 32: Twaalf geselecteerde maanden die de seizoens- en ruimtelijke variatie van grondwateraanvulling aan de bovenkant van het model domein tonen.

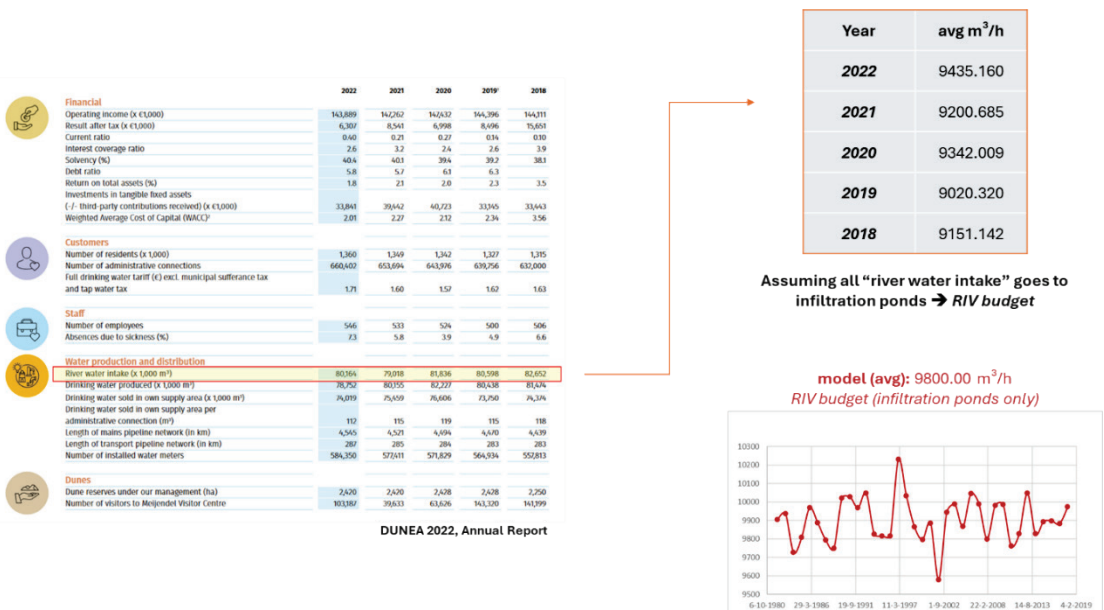


Figuur 33: De ruimtelijke verdeling van de totale jaarlijkse grondwateraanvulling van de referentie situatie zonder een KNMI'23-klimaatsscenario en de drie grondwateraanvulling scenario's (paragraaf 2.3.2, pagina 24, voor meer informatie). De groene kleuren (positieve waarden) duiden op grondwateraanvulling en paarse kleuren (negatieve waarden) op verdamping / verwijdering van grondwater uit het grondwatersysteem.



Figuur 34: Vergelijking van de totale jaarlijkse grondwateraanvulling, over de tijd, van de referentie situatie zonder een KNMI'23-klimaatsscenario en de drie grondwateraanvulling scenario's (paragraaf 2.3.2, pagina 24, voor meer informatie). Veranderingen zijn doorgevoerd door de MetaSwap resultaten te combineren met lineaire trends gebaseerd op de KNMI'23-klimaatsscenario's voor neerslag (KNMI, 2023).

## A.2 Bijlage 2: Waterbalans termen oppervlaktewater (met betrekking tot het MODFLOW model module river (RIV))

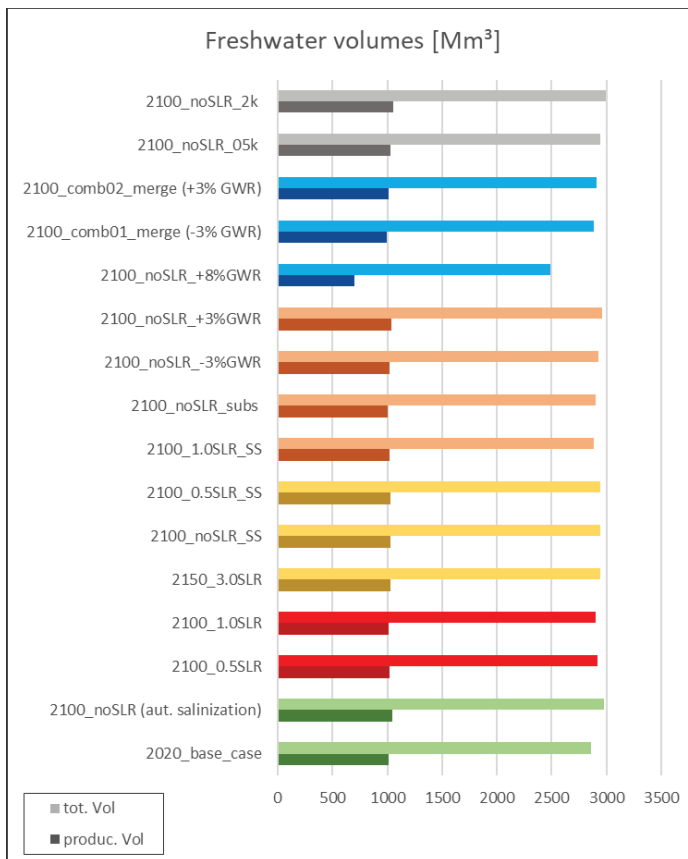


Figuur 35: Waargenomen rivierwaterinname (tabel van Dunea met samengestelde gegevens over meerdere jaren, bron: Dunea, 2022) in vergelijking met de gemodelleerde RIV-budgetten van de infiltratieplassen voor meerdere jaren (grafiek met rode lijn rechtsonder).

### Bijlage 3: Samenvatting van de resultaten van elk scenario.

Tabel 10: Vergelijking van het totale zoetwatervolume berekend volgens verschillende scenario's. Product. Vol = Dunea-productiegebieden (Meijndel & Berkheide); tot. Vol = totaal modeldomein; aut. salinization = autonome verzilting.

	n	Scenario	product. Vol [Mm <sup>3</sup> ]	% base_case	% noSLR	tot. Vol [Mm <sup>3</sup> ]	% base_case	% noSLR
Base runs	1	2020_base_case	1056.80	-	-	2995.20	-	-
	2	2100_noSLR (aut. salinization)	1030.30	-2.5%	-	2946.50	-1.6%	-
Sea level scenarios	3	2100_0.5SLR	1015.00	-4.0%	-1.50%	2914.00	-2.7%	-1.10%
	4	2100_1.0SLR	996.80	-5.7%	-3.30%	2885.20	-3.7%	-2.10%
	5	2150_3.0SLR	701.70	-33.6%	-31.90%	2490.10	-16.9%	-15.50%
	6	2100_noSLR_SS	1033.40	-2.2%	0.30%	2959.00	-1.2%	0.40%
DEM changes scenarios	7	2100_0.5SLR_SS	1018.30	-3.6%	-1.20%	2926.00	-2.3%	-0.70%
	8	2100_1.0SLR_SS	1001.70	-5.2%	-2.80%	2901.00	-3.1%	-1.50%
	9	2100_noSLR_subs	1022.00	-3.3%	-0.80%	2886.30	-3.6%	-2.00%
Climate scenarios	10	2100_noSLR_-3%GWR	1030.00	-2.5%	0.00%	2942.70	-1.8%	-0.10%
	11	2100_noSLR_+3%GWR	1030.50	-2.5%	0.00%	2944.20	-1.7%	-0.10%
	12	2100_noSLR_+8%GWR	1030.80	-2.5%	0.00%	2945.60	-1.7%	0.00%
Combined scenarios	13	2100_comb01_merge (-3% GWR)	1012.60	-4.2%	-1.70%	2903.80	-3.1%	-1.40%
	14	2100_comb02_merge (+3% GWR)	1017.30	-3.7%	-1.30%	2917.20	-2.6%	-1.00%
Geology scenarios	15	2100_noSLR_05k	1041.60	-1.4%	1.10%	2976.40	-0.6%	1.00%
	16	2100_noSLR_2k	1009.10	-4.5%	-2.10%	2860.10	-4.5%	-2.90%



Figuur 36: Het totale zoetwatervolume berekend voor het totale modeldomein (tot. vol) en voor Dunea-productiegebieden (product. vol).

## A.4 Bijlage 4: Analytische beschrijving van een zoetwaterlens

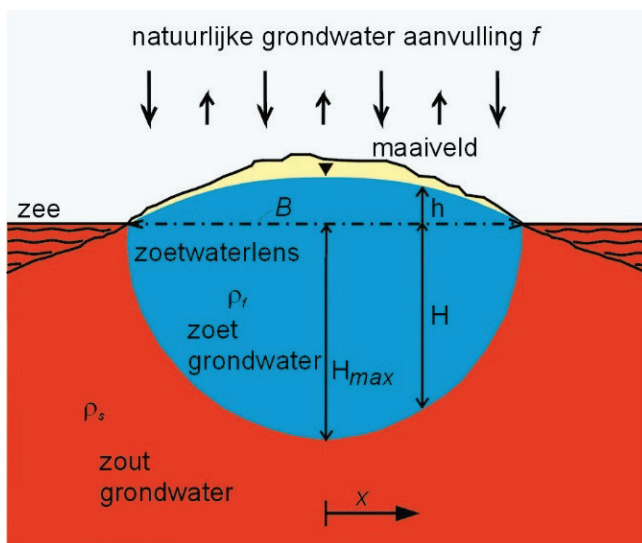
De (hypothetische) dikte en het volume van een simpele zoetwaterlens drijvend op zout grondwater (en ingesloten door twee vaste waterpeilen) kan goed ingeschat worden aan de hand van analytische vergelijkingen (Oude Essink, 2001; Van Dam, 1992), zie de vergelijkingen hieronder, en Figuur 37:

$$H = \sqrt{\frac{f(0.25B^2 - x^2)}{k(1+\alpha)\alpha}} \quad \text{Vergelijking 1}$$

$$V = \frac{\pi n B^2}{8} \sqrt{\frac{f(1+\alpha)}{k\alpha}} \quad \text{Vergelijking 2}$$

waarin:

- H = dikte van de zoetwaterlens onder zeeniveau (m),
- V = volume zoet grondwater per strekkende meter (m<sup>3</sup>/m'),
- k = hydraulische conductiviteit of doorlatendheid (m/dag),
- n = effectieve porositeit (-),
- B = breedte van het duingebied (m),
- f = natuurlijke grondwateraanvulling (m/dag),
- α = (ρ<sub>s</sub> - ρ<sub>f</sub>) / ρ<sub>f</sub>, relatieve dichtheidsverschil (-) (gelijk aan 0.025 in oceaan water),
- ρ<sub>s</sub> = dichtheid van zout grondwater, 1025 kg/m<sup>3</sup>,
- ρ<sub>f</sub> = dichtheid van zoet grondwater, 1000 kg/m<sup>3</sup>.



Figuur 37: Schematische weergave van een dynamische zoetwaterlens die drijft op het zoute grondwater.

Bij het volume zoet grondwater zijn aldus de volgende parameters van belang: met name de breedte van het duingebied B, en in mindere mate de natuurlijke grondwateraanvulling f en de doorlatendheid van het watervoerend pakket k. De effectieve porositeit n en het relatieve dichtheidsverschil tussen zoet en zout grondwater α zijn verhoudingsgewijs waarden voor de Nederlandse situatie die als constant kunnen worden beschouwd.

Vergelijking (2) laat zien dat er een kwadratisch verband bestaat tussen de breedte van het duingebied B en het theoretische volume aan zoet grondwater in de zoetwaterlens. Dit theoretische volume wordt bereikt als: a. er geen grondwateronttrekkingen plaatsvinden, b. er geen weerstandslaag aanwezig is waardoor een groot deel van het geïnfilterde grondwater

in de watervoerende laag wordt afgevoerd, en c. het systeem de tijd krijgt om een dynamische evenwichtssituatie in te stellen.

Aan de hand van wederom analytische vergelijkingen is in te schatten hoe snel zo'n zoetwaterlens zich ontwikkelt tot een dynamische evenwichtssituatie (Boekelman, 1998; Oude Essink, 2001). De karakteristieke tijdsduur  $T$ , voordat de zoetwaterlens 99.5% van zijn uiteindelijke vorm heeft bereikt, is:

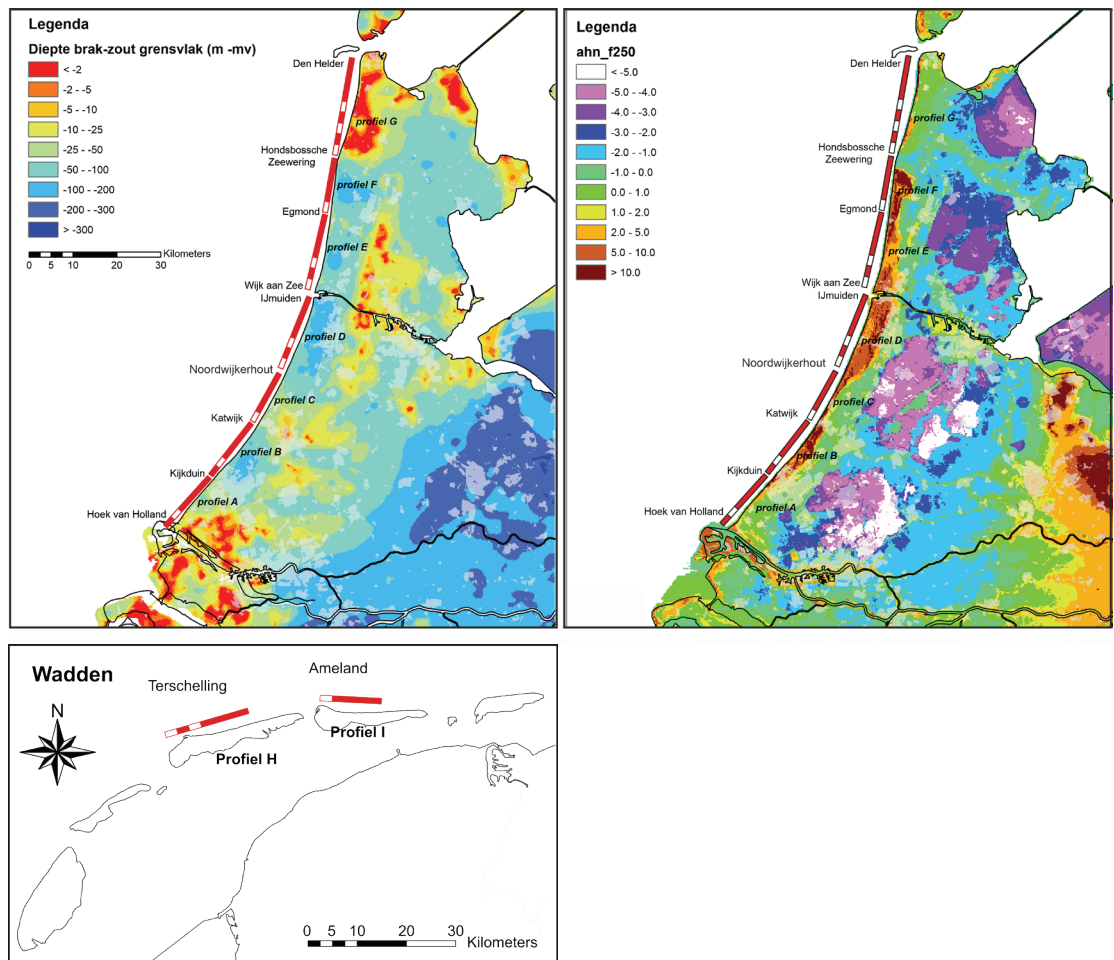
$$T = 3 \frac{\pi n B}{8} \sqrt{\frac{(1 + \alpha)}{k f \alpha}} \quad \text{Vergelijking 3}$$

waarin:

$T$  = karakteristieke tijdsduur [dag].

Voor de meeste zoetwaterlenzen in de duingebieden in het kustgebied ligt deze karakteristieke tijdsduur  $T$  tussen de 75 en 200 jaar. Het ontwikkelen van een dergelijke zoetwaterlens is dus een langdurig proces.

## A.5 Bijlage 5: Locaties 2D zoet-zout profiel modellen langs de Hollandse kust en de Waddeneilanden



Figuur 38: Boven de locaties van de 2D zoet-zout profiel modellen over zeven segmenten langs de Hollandse kust: linksboven inclusief de diepte van het brak-zout grensvlak (1.0 g Cl/L) (De Louw et al., 2019), rechtsboven inclusief maaiveldhoogte (m). Onder de locaties op twee Waddeneilanden.