

Terschelling grondwatermodellering: Impact klimaatverandering en zeespiegelstijging



Terschelling grondwatermodellering: Impact klimaatverandering en zeespiegelstijging

Auteur(s)

mevrouw A.M. Davids
de heer dr. P.T.M. Vermeulen
mevrouw J.R. Pouwels
de heer dr. P.G.B. de Louw
de heer dr. V.P. Kaandorp

Partners

Van Hall Larenstein University of Applied Sciences, LEEUWARDEN
Wageningen Social & Economic Research, WAGENINGEN

Deze publicatie is tot stand gekomen binnen de PPS 'Handelingsperspectief Klimaatadaptatie Landbouw Terschelling' (LWV20.317) en onder andere gefinancierd door TKI Deltatechnologie.

Terschelling grondwatermodellering: Impact klimaatverandering en zeespiegelstijging

Opdrachtgever	TKI Deltatechnologie p/a Vereniging van Waterbouwers
Contactpersoon	Dhr. Ate Oosterhof, Van Hall Larenstein
Referenties	
Trefwoorden	Grondwatermodel, Terschelling, zoet-zout, klimaatverandering, zeespiegelstijging, scenario's, verzilting, drinkwater, landbouw, natuur.

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	12-12-2025
Projectnummer	11207941-005
Document ID	11207941-005-BGS-0004
Pagina's	31
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

A.M. Davids P.T.M. Vermeulen J.R. Pouwels P.G.B. de Louw V.P. Kaandorp
--

Samenvatting

In het project 'Toekomstperspectief Polder Terschelling - Handelingsperspectief Klimaatadaptatie Landbouw Terschelling' wordt met een grote groep stakeholders gekeken naar de toekomst van het watersysteem van het eiland Terschelling. Deze rapportage bevat een beschrijving van de toepassing van het grondwatermodel van Terschelling (Vermeulen et al. 2025), om de impact van klimaatverandering en zeespiegelstijging te kwantificeren. Het model is opgezet voor iMOD-WQ (Verkaik & Janssen, 2015) waarmee een dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en stoftransport gemodelleerd kan worden. Het model is ontwikkeld voor de berekening van de grondwaterstanden, waterstromen en de zoet-zout verdeling in de huidige situatie voor het gehele eiland.

Klimaat- en zeespiegelscenario's

Met het model zijn de effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging doorgerekend tot 2050 en 2100. Hierbij is gebruik gemaakt van de meest recente inzichten van het KNMI (KNMI, 2023) en wordt gerekend met een droog en een nat scenario.

Op de korte termijn, tot 2050, hebben veranderingen in neerslagpatronen de grootste invloed op het grondwatersysteem. De extremen in grondwaterstanden worden versterkt. In de duinen stijgen de grondwaterstanden (GHG) tijdens natte periodes, terwijl de impact op de polder beperkter blijft door afwatering. Tijdens droge periodes (GLG) dalen de grondwaterstanden echter vooral in de polder aanzienlijk. Ook de afvoeren veranderen: in de zomer nemen ze af, terwijl ze in de winter juist toenemen, zowel bij Liessluis als bij Kinnum.

Op de lange termijn, richting 2100, zal de stijgende zeespiegel een steeds dominantere rol spelen in de veranderingen van het grondwatersysteem. Één van de gevolgen is de krimp van de zoetwaterlens in het duingebied. De totale hoeveelheid zoet grondwater (met een zoutgehalte lager dan 0,15 g/L) neemt in 2100 af met ongeveer 33 miljoen m³ in het Hn-scenario en met circa 53 miljoen m³ in het Hd-scenario. Tegelijkertijd stijgen de grondwaterstanden in de duinen aanzienlijk door de toenemende druk die de zeespiegelstijging op het grondwatersysteem uitoefent.

Ook voor 2100 wordt verwacht dat in de zomer de grondwaterstanden dalen in de polder, terwijl ze in de winter juist stijgen. De afvoer bij de sluizen neemt over het jaar gezien toe, waarbij de seizoensverschillen groter worden: de afvoer neemt toe in de winter en af in de zomer. Dit benadrukt de toenemende variabiliteit van watersysteem en het belang van maatregelen.

Effect op stakeholders

De veranderingen in het watersysteem hebben effect op de stakeholders in de verschillende gebieden. De natuur in de duinen zal met name in de lager gelegen duinvalleien hinder ondervinden van de nattere omstandigheden. Op locaties zonder afwatering zal gedurende de winter vaker (langdurige) inundatie kunnen voorkomen. Hoewel hogere grondwaterstanden in de duinen in principe gunstig zijn voor de drinkwaterwinning, vormt de krimp van de zoetwaterbel een bedreiging. Recreatieterreinen in de duinrand krijgen meer en vaker last van hoge grondwaterstanden, maar dit kan zeer lokaal zijn afhankelijk van o.a. hoogteligging en afwatering (greppels, drainage). In de polder zijn met name de dalende grondwaterstanden in de zomer en het krimpen van de zoete regenwaterlenzen een bedreiging voor de grasgroei op het land van de (melk)veehouders en de voedselbeschikbaarheid voor weidevogels.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Klimaatscenario's en zeespiegelstijging	7
2.1	Aanpak	7
2.2	Implementatie klimaatscenario's in het model	7
2.3	Implementatie zeespiegelstijging in het model	11
3	Resultaten	12
3.1.1	Inzichten eiland breed	12
3.1.2	Inzichten per deelgebied	16
3.1.2.1	Duinen	17
3.1.2.2	Duinrand	19
3.1.2.3	Polder	20
4	Implicaties voor stakeholders en functies	22
4.1.1	(Melk)veehouders in de polder	22
4.1.2	Agrarisch natuurbeheer in de polder	24
4.1.3	Recreatie in de duinrand	24
4.1.4	Natuur in de duinen	26
4.1.5	Drinkwaterwinning	28
5	Conclusies	29
6	Literatuur	30

1 Inleiding

Het eiland Terschelling staat voor uitdagingen op het gebied van zoetwaterbeschikbaarheid. Terschelling is omringd door open zee water en de aanvoer van zoet water is niet of beperkt mogelijk. Een belangrijke zoetwater voorraad is de zoetwaterbel onder het duingebied, waar ook de drinkwaterwinning van het eiland ligt en (natte) natuur voorkomt. In de overgang van duinen naar polder komen ondiepe grondwaterstanden en kwel voor, wat belangrijk is voor kwelafhankelijke natuur maar tegelijkertijd zorgt voor (grond)wateroverlast bij bebouwing en recreatieterreinen. In de polder is beperkt zoet water aanwezig in dunne regenwaterlenzen. Terwijl er nu al uitdagingen zijn op het gebied van (zoet)waterbeheer is de verwachting dat deze groter zullen worden als gevolg van klimaatverandering en zeespiegelstijging.

In het project 'Toekomstperspectief Polder Terschelling - Handelingsperspectief Klimaatadaptatie Landbouw Terschelling' wordt met een grote groep stakeholders gekeken naar de toekomst van het watersysteem van het eiland Terschelling. In een eerdere fase van het project is een grondwatermodel opgezet waarin het watersysteem op het eiland is gesimuleerd en waterbalansen, (grond)waterstromen, kwel, grondwaterstanden en afvoeren kunnen zijn bepaald (Vermeulen et al., 2025).

Dit model is ingezet voor het doorrekenen van scenario's van klimaatverandering en zeespiegelstijging om veranderingen in het watersysteem tot 2050 en 2100 te bepalen. Dit levert kennis op voor alle partijen op het eiland die gebruik maken, afhankelijk zijn of overlast hebben van het (grond)watersysteem. Op basis van de resultaten van deze studie kunnen stakeholders werken aan maatregelen en toekomststrategieën.

In deze technische rapportage wordt eerst ingegaan op de voorspellingen van klimaatverandering en zeespiegelstijging en hoe deze in het model zijn toegepast. Vervolgens worden de resultaten van de berekeningen gepresenteerd voor het eiland als geheel en voor deelgebieden. Daarna wordt besproken wat de resultaten betekenen voor de verschillende gebruikers van het watersysteem.

2 Klimaatscenario's en zeespiegelstijging

2.1 Aanpak

Voor het doorrekenen van de effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging wordt gebruik gemaakt van het grondwatermodel van Terschelling (Vermeulen et al., 2025). Het model is opgezet voor iMOD-WQ (Verkaik & Janssen, 2015) waarmee dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming en stoftransport berekend kunnen worden. Het model is ontwikkeld voor de berekening van de grondwaterstanden, waterstromen en de zoet-zout verdeling in de huidige situatie voor het gehele eiland. Voor een gedetailleerde beschrijving van dit model wordt verwezen naar de rapportage van Vermeulen et al. (2025).

Voor het bepalen van de invloed van klimaatverandering en zeespiegelstijging is het grondwatermodel verlengd tot het jaar 2105. Daarbij zijn de neerslag en verdamping in het model aangepast op basis van de verwachte klimaatverandering en is een stijgende zeespiegel toegevoegd op basis van de zeespiegelstijgingsverwachting. Om de veranderingen te bepalen worden de resultaten van deze scenarioberekeningen vergeleken met een referentieberekening waarin het huidige klimaat en de huidige zeespiegel tot 2105 worden doorgezet. Het model runt op dag basis, wat betekent dat er een dagelijks variërende grondwateraanvulling in het model aanwezig is.

2.2 Implementatie klimaatscenario's in het model

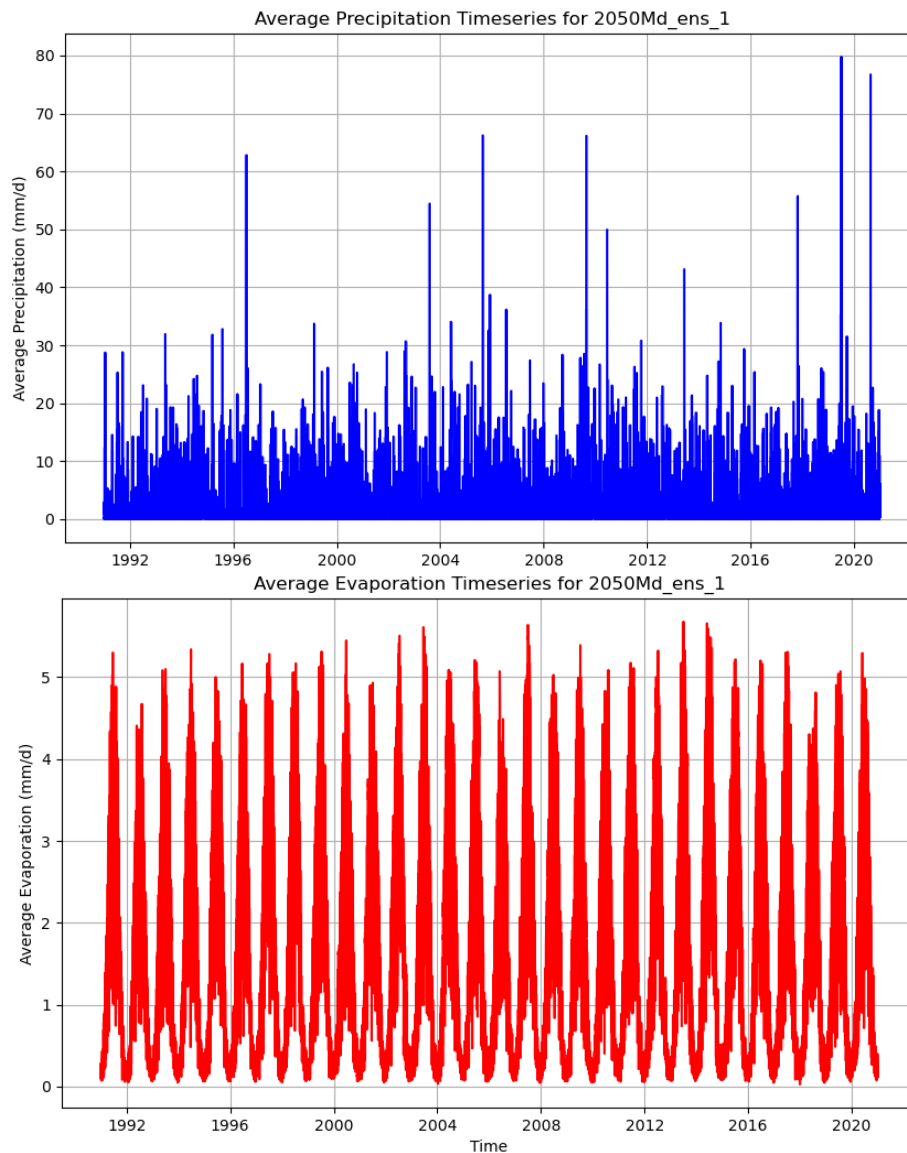
De gebruikte klimaatscenario's zijn gebaseerd op de KNMI'23 klimaatscenario's (KNMI, 2023). In deze KNMI scenario's zijn, naast een referentiescenario, 4 toekomstscenario's gepresenteerd (Figuur 1); verdrogend klimaat met hoge uitstoot (Hd), vernattend klimaat met hoge uitstoot (Hn), verdrogend klimaat met lage uitstoot (Ld) en vernattend klimaat met lage uitstoot (Ln). In deze studie focussen we op Hd en Hn, zodat de maximale impact van de hoge CO₂ uitstoot wordt onderzocht en ook de bandbreedte tussen een verdrogend en een vernattend toekomstig klimaat.



Figuur 1 Vier scenario's voor klimaatverandering in Nederland (KNMI, 2023).

Er zijn door het KNMI per klimaatscenario meerdere ensembles (tijdreeksen met weergegevens) geproduceerd (Figuur 2) die op dagbasis het klimaat van de referentie en klimaatscenario's representeren. Om de toekomstige ontwikkeling van de zoetwaterlens te bepalen zijn klimaatreeksen nodig met een geleidelijke ontwikkeling van het heden naar de toekomst, die vervolgens kan worden vergeleken met een referentie. Daarom is ervoor gekozen om een referentie-ensemble te selecteren (tijdsreeks van 30 jaar), deze te dupliceren in de toekomst tot 2105 (3 maal het referentie-ensemble in totaal) en vervolgens de klimaatverandering toe te passen voor Hn en Hd middels een tijdsafhankelijke factor.

Als referentie is ensemble 2050Md_ens_1 geselecteerd (Figuur 2). Er is specifiek voor dit ensemble gekozen omdat het relatief de minst grootste extremen in natte en droge jaren bevat. Voor de gebruikte methode is de impact van welk referentie ensemble wordt geselecteerd gering. Voor deze referentie ensemble is neerslag en verdamping aanwezig, wat vervolgens met behulp van dezelfde methode als de historische dataset (zie Vermeulen et al., 2025: *Grondwateraanvulling*) is omgezet naar grondwateraanvulling.



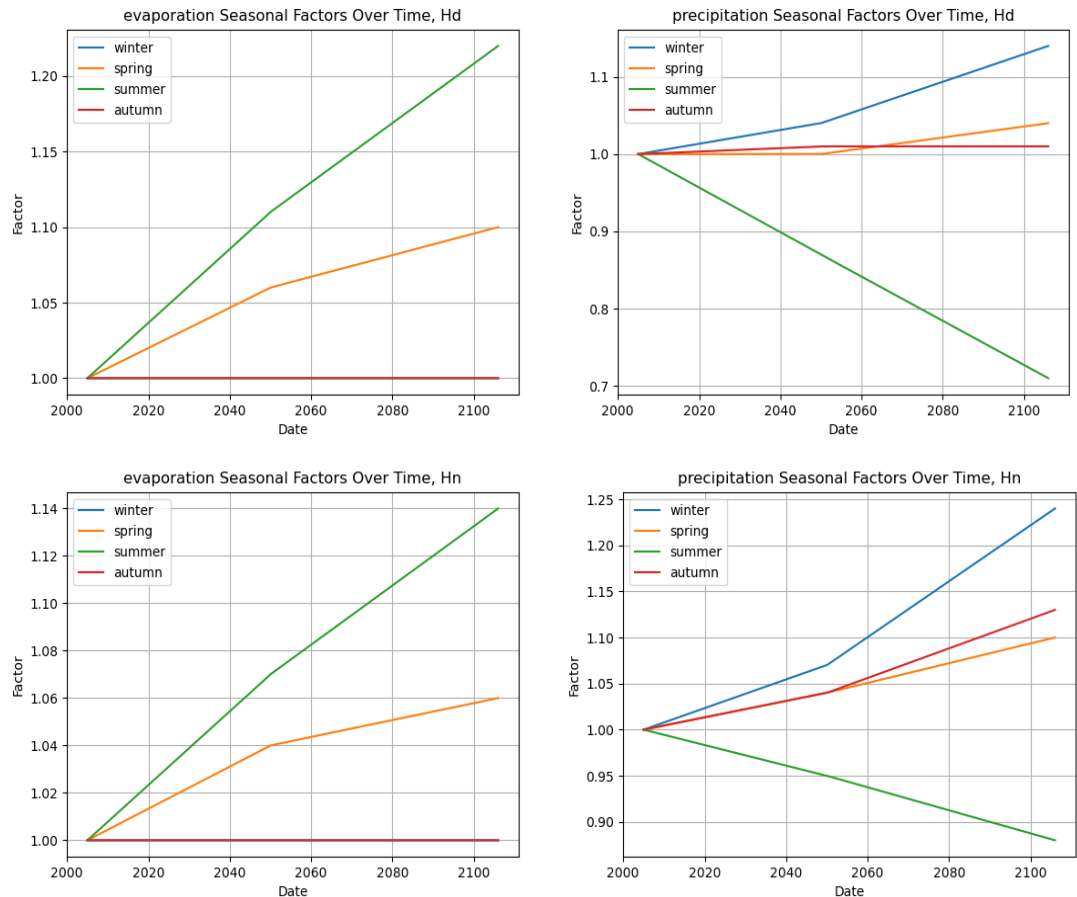
Figuur 2 Neerslag (boven) en verdamping (onder) in mm/d voor het referentie ensemble 1.

Om een geleidelijk veranderende klimaatreeks te krijgen van heden tot 2100 is gebruik gemaakt van factoren. Deze factoren zijn te zien in Tabel 1 en zijn gebaseerd op de KNMI'23-klimaatscenario's (KNMI, 2023). Per seizoen is een factor beschikbaar. Hierin is te zien dat de verwachting is dat de neerslag in de herfst, winter en lente toeneemt en in de zomer afneemt. De verdamping neemt in de lente en zomer toe.

Tabel 1 Overzicht van de factoren gebaseerd op KNMI, 2023. De percentages zijn omgezet naar een factor ten opzicht van 1 (getallen boven 1 geven een verhoging aan, getallen onder 1 een verlaging).

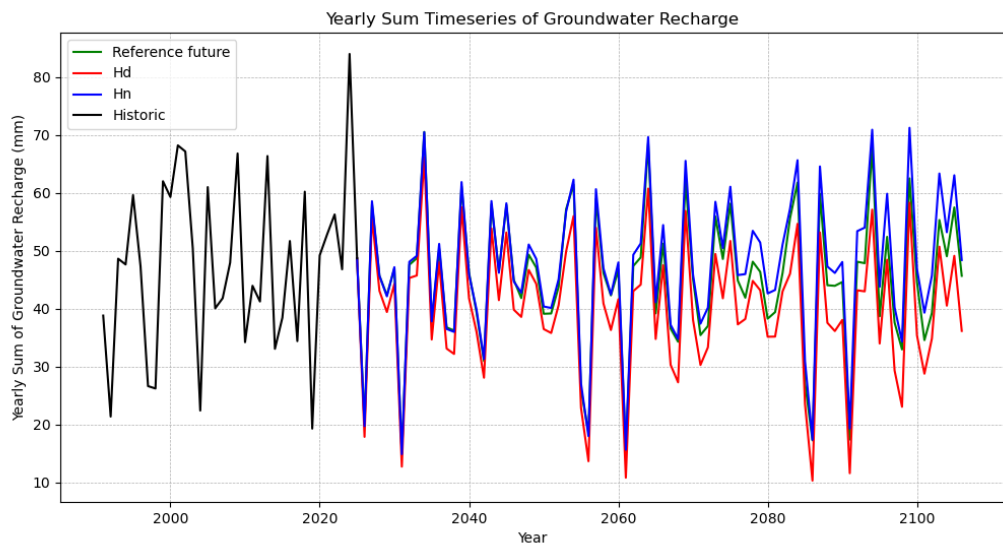
	Klimaatscenario	Winter	Lente	Zomer	Herfst
Evaporatie	2050Hd	1	1.06	1.11	1
	2050Hn	1	1.04	1.07	1
	2100Hd	1	1.1	1.22	1
	2100Hn	1	1.06	1.14	1
	2100Ld	1	1.06	1.08	1
Neerslag	2050Hd	1.04	1	0.87	1.01
	2050Hn	1.07	1.04	0.95	1.04
	2100Hd	1.14	1.04	0.71	1.01
	2100Hn	1.24	1.1	0.88	1.13
	2100Ld	1.04	1.01	0.92	1.04

Vervolgens zijn deze factoren omgezet naar tijdsafhankelijke factoren middels lineaire interpolatie (Figuur 3). Het startpunt is 2005 en het eindpunt 2105. Per seizoen is een factor bepaald zodat de seizoensveranderingen (bijvoorbeeld nattere winters, drogere zomers) wordt meegenomen.



Figuur 3 Tijdsafhankelijke factoren gebaseerd op de KNMI 2023 klimaatscenario's. Voor ieder seizoen. Links evaporatie, rechts neerslag, Boven Hd, onder Hn.

Figuur 4 laat de totaal jaarlijkse grondwateraanvulling voor Terschelling zien in millimeters. Duidelijk is dat het natte scenario (Hn) een hogere grondwateraanvulling heeft dan referentie (blauw) en dat het droge scenario (Hd) minder grondwateraanvulling heeft dan de referentie.



Figuur 4 Totaal jaarlijkse grondwateraanvulling in mm voor heel Terschelling. Historische data (zwart) met daar achteraan de klimaatscenario's; referentie (groen), Hn (blauw), Hd (rood).

2.3 Implementatie zeespiegelstijging in het model

Voor zeespiegelstijging zijn de KNMI'23 kerncijfers gebruikt (KNMI, 2023). Tabel 2 laat de zeespiegelstijging ten opzichte van de referentieperiode 1995-2014 zien.

Tabel 2 Zeespiegelstijging bij de Nederlandse kust. Getallen in centimeter verandering ten opzichte de referentieperiode 1995-2014 (KNMI, 2023).

Jaar	Zeespiegel bij Nederlandse kust
2050	+27
2100	+82

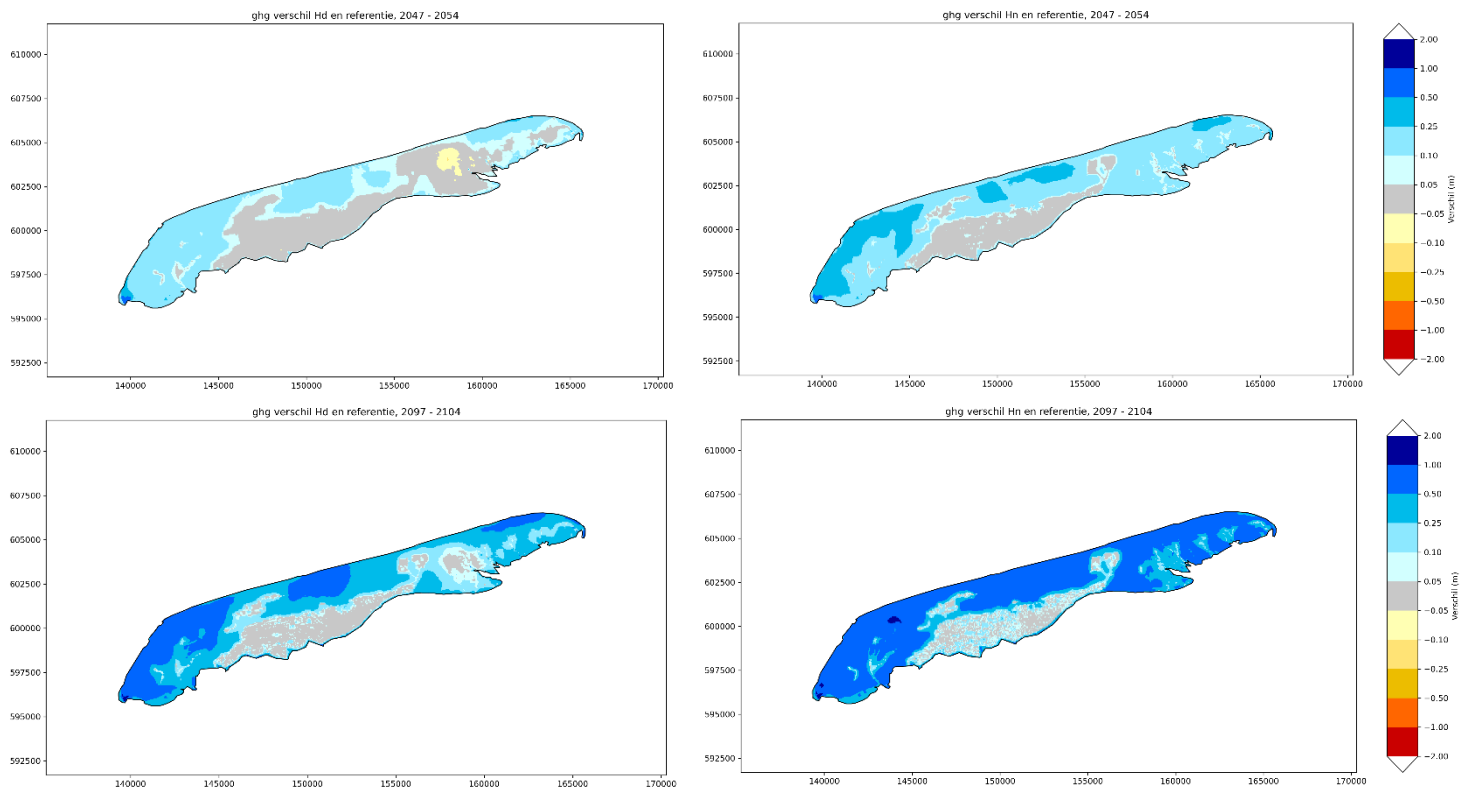
In het grondwatermodel gaat de zeespiegelstijging niet geleidelijk maar wordt het instantaan opgelegd. Er zijn daarom in totaal 3 verschillende zeespiegels aan het model toegevoegd: 1) het heden (rekening houdend met de effecten van eb en vloed, zie Vermeulen et al., 2025), 2) de situatie rond 2050, en 3) de situatie rond 2100. De 2050 zeespiegelstijging is toegepast vanaf 2035 en de 2100 zeespiegelstijging vanaf 2060. Voor de 2050 en 2100 zeespiegelstijging is de nieuwe stijghoogte op wadplaten en stranden op dezelfde manier berekend als voor het heden. De eb en vloed waardes zijn verhoogd met 27cm en 82cm voor respectievelijk 2050 en 2100. Vervolgens is het 6 uur model gedraaid voor 3 maanden tot er een nieuw evenwicht is bereikt. Deze stijghoogte wordt vervolgens gebruikt in het langjarig model. Voor een uitgebreider overzicht van deze methode zie Vermeulen et al. (2025).

3 Resultaten

3.1.1 Inzichten eiland breed

De modelberekeningen geven inzicht in het effect van klimaatverandering en zeespiegelstijging op verschillende aspecten van het watersysteem waaronder grondwaterstanden, afvoeren en de zoet-zout verdeling in de ondergrond. Gekeken naar de scenario's Hd en Hn, hebben op korte termijn met name veranderingen in neerslagpatronen invloed op het grondwatersysteem (tot 2050), op lange termijn (2100) krijgt voortschrijdende zeespiegelstijging een steeds grotere invloed.

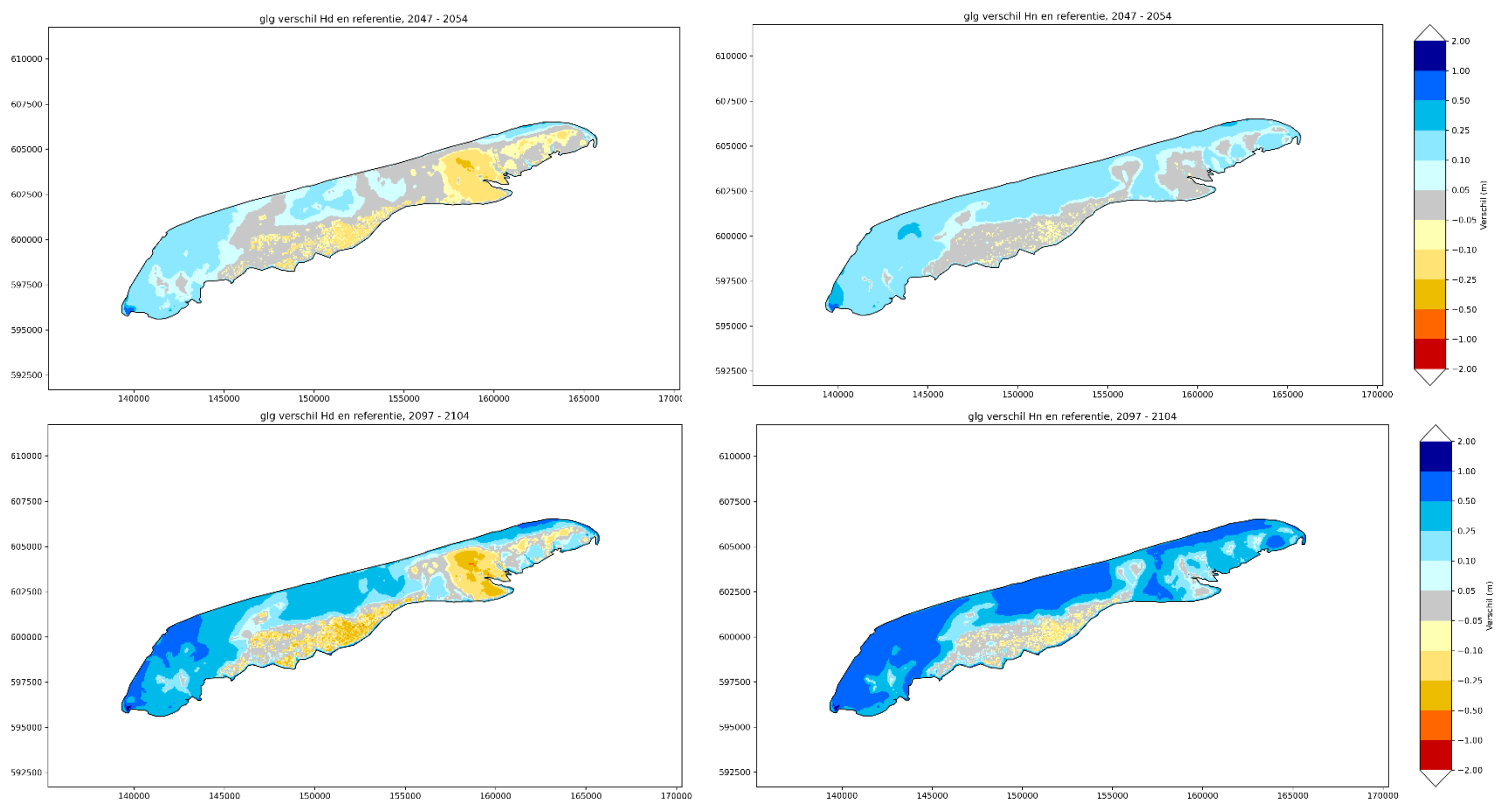
Grondwaterstanden volgen in de basis de veranderingen in neerslag en verdamping tussen de seizoenen. In de klimaatscenario's worden de winters natter en de zomer droger en dit is terug te zien in de Gemiddeld Hoge Grondwaterstanden (GHGs; als indicatie natte seizoen / winter) en Gemiddeld Lage Grondwaterstanden (GLGs; als indicatie droge seizoen / zomer). De modelresultaten laten zien dat de GHGs over nagenoeg het hele duingebied stijgen in zowel het Hd als Hn scenario (Figuur 5). In 2050 is deze stijging in het Hd scenario beperkt tot circa 10 - 25 cm in 2050, terwijl dit in het Hn scenario in delen van de duinen al op kan lopen tot 50 cm in 2050. Richting 2100 stijgen de GHGs verder, in het Hd scenario met in totaal 25 tot 100 cm en in het Hn scenario 50 tot 200 cm. De stijging in de GHG is in de polder beperkt door het afwateringssysteem. Dit effect is ook te zien in het duingebied ten zuiden van West aan Zee en bij de Bloedsloot (ten noordoosten van Oosterend), waar sloten en duinrellen water vanuit de duinen afvoeren. In 2100 zijn in de polder wel lokaal stijgende GHGs te zien, dit betreft met name de hoger gelegen delen zoals de strandwallen.



Figuur 5 Verschil in Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) met de referentie voor Hd (links) en Hn (rechts), voor 2047-2054 (boven) en 2097-2104 (onder). Oranje/rood geeft aan dat de grondwaterstanden lager zijn in de referentie en blauw dat de grondwaterstanden hoger zijn in de referentie. Resultaten zijn van de eerste model laag (freatisch).

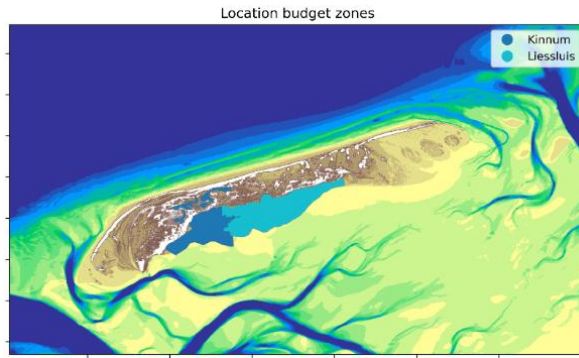
De veranderingen in de GLGs laten een gevarieerder beeld zien. Door de drogere zomers dalen in 2050 in de polder de lage grondwaterstanden met circa 0 – 25 cm in Hd en maar zeer beperkt (lokaal tot 10 cm) in Hn. Veranderingen lijken vooral plaats te vinden in het oostelijke deel van de polder (afvoergebied Liessluis). Tegelijkertijd laten de modelresultaten zien dat de lage grondwaterstanden in het duingebied richting 2050 stijgen met 5 – 25 cm. Dit is het gevolg van de toename van de totale jaarlijkse neerslagsom, welke in het duingebied volledig in de ondergrond wordt geborgen en tot stijgende grondwaterstanden zorgt welke niet volledig uitzakken in de zomer. Net als bij de GHGs is deze stijging niet of beperkt te zien in de duingebieden met afwaterende sloten.

Richting 2100 worden de dalende lage grondwaterstanden in de polder en de stijgende grondwaterstanden in de duinen versterkt. De zomer grondwaterstanden in de duinen stijgen met 10 – 100 cm. In de polder dalen de zomer grondwaterstanden met 5 tot meer dan 25 cm, vooral in het oostelijke deel van de polder. Opvallend is dat de strandwallen in het westelijke deel stijgende GLGs laten zien: hier gebeurt in het klein hetzelfde als in de duinen.



Figuur 6 Verskil in Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) met de referentie voor Hd (links) en Hn (rechts), voor 2047-2054 (boven) en 2097-2104 (onder). Oranje/rood geeft aan dat de grondwaterstanden lager zijn in de referentie en blauw dat de grondwaterstanden hoger zijn in de referentie. Resultaten zijn van de eerste model laag (freatisch).

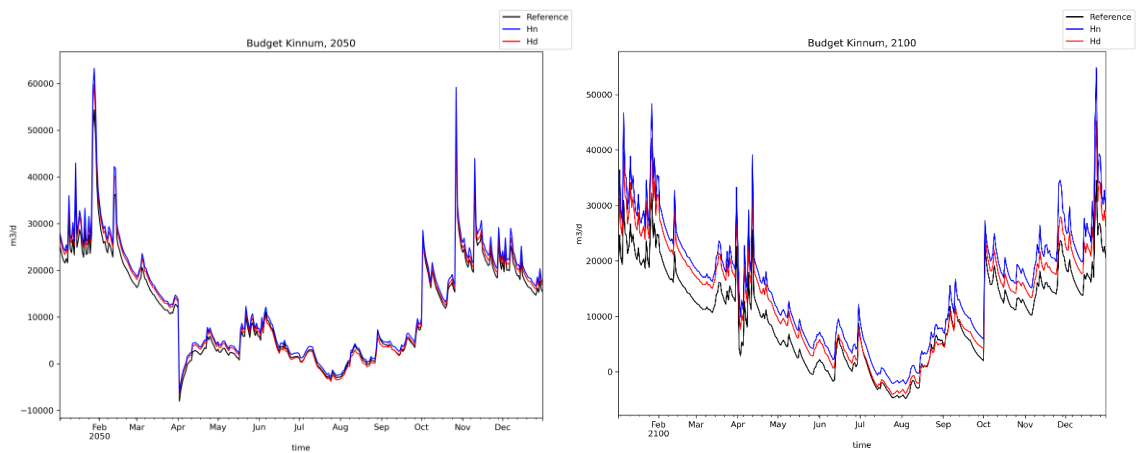
Doordat de jaarlijkse neerslag toeneemt worden de afvoeren bij de sluisen over het jaar gezien hoger (Tabel 3); in 2050 met 3 tot 15% en in 2100 met 15 tot 56%. De verschillen tussen de droge en natte scenario's zijn hierbij duidelijk te zien. De afvoer lijkt meer toe te nemen bij Kinnum, vermoedelijke doordat dit afvoergebied ook een deel van de duinen ten zuiden van West aan Zee bevat. Ook de extremen in afvoer worden groter. De afvoeren nemen over het algemeen jaarrond toe, maar voor Liessluis is ook de trend te zien met toename in de winter en afname in de zomer (Figuur 8, Figuur 9).



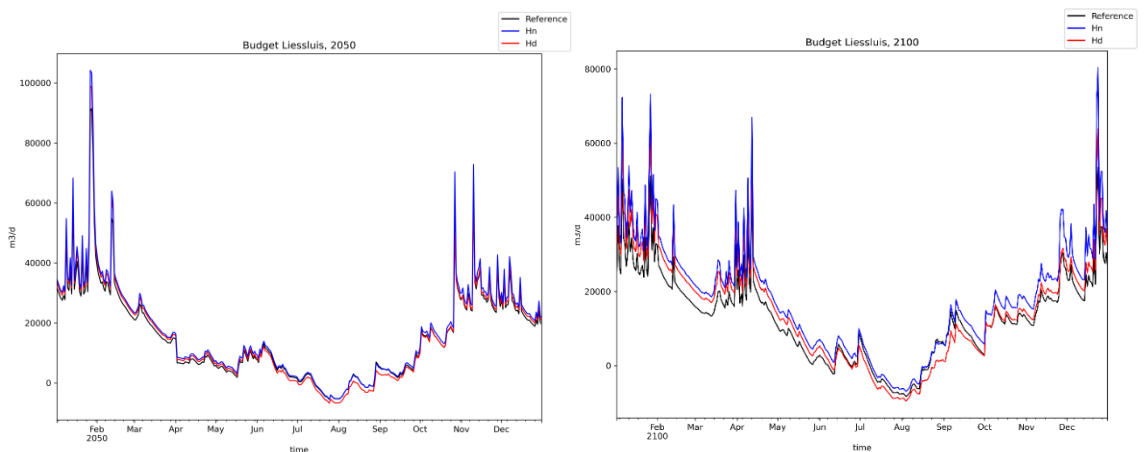
Figuur 7 Afvoergebieden van Kinum en Liessluis.

Tabel 3 Procentuele verandering in de totale afvoer over het jaar ten opzichte van de referentie toestand voor Kinum en Liessluis voor Hd en Hn voor 2050 en 2100.

Afvoer gebied	Scenario	2050	2100
Kinnum	Hd	+7%	+32%
	Hn	+15%	+56%
Liessluis	Hd	+3%	+15%
	Hn	+11%	+40%

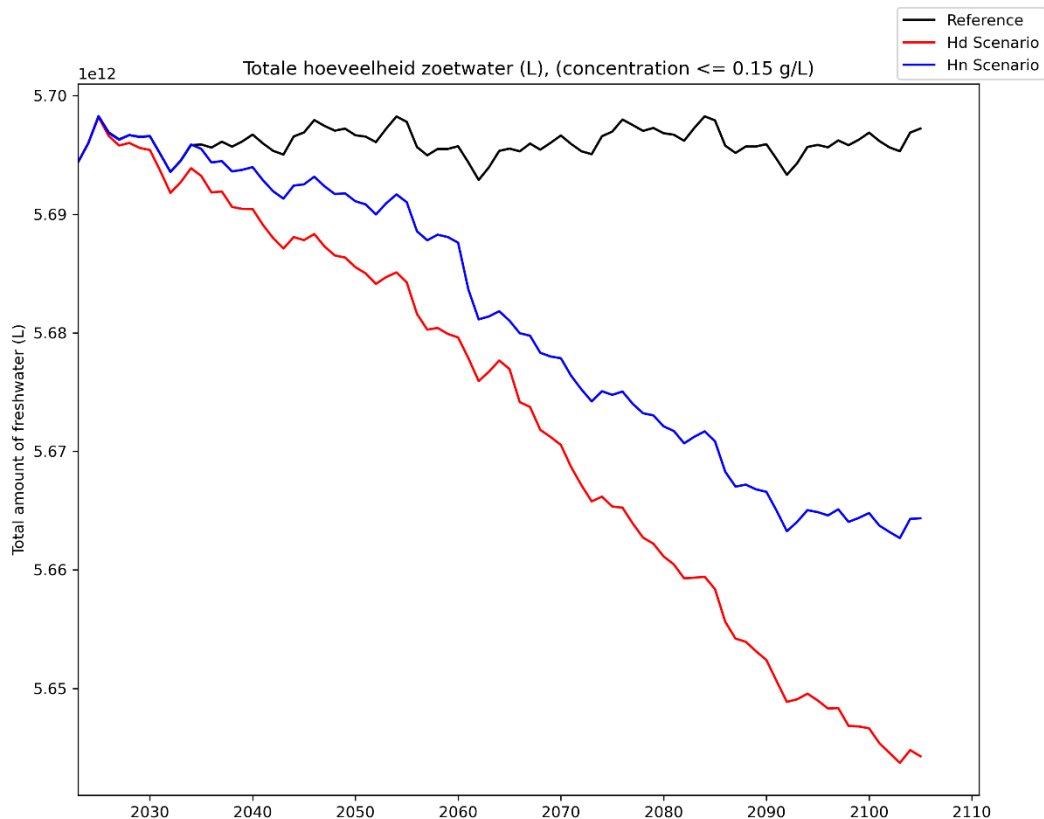


Figuur 8 Totale afvoer van Kinum in 2050 (links) en 2100 (rechts) voor referentie (zwart), Hn (blauw), en Hd (rood). Figuur 7 toont de ligging van afvoergebieden Kinum.



Figuur 9 Totale afvoer van Liessluis in 2050 (links) en 2100 (rechts) voor referentie (zwart), Hn (blauw), en Hd (rood). Figuur 7 toont de ligging van afvoergebieden Liessluis.

De veranderingen in grondwaterstanden en -stroming als gevolg van veranderingen in neerslag, verdamping en zeespiegel hebben ook een effect op de zoet-zout verdeling in de ondergrond en daarmee de zoetwatervoorraden. De modelresultaten laten zien dat de zoetwaterlens onder het duingebied van Terschelling krimpt. Figuur 10 laat zien dat de totale hoeveelheid zoet grondwater (concentratie kleiner dan 0,15 g/L) in 2100 in het Hn scenario afneemt met ~33 miljoen m³ en in het Hd scenario met ~53 miljoen m³. Hoewel dit een relatief kleine fractie (~0,5 tot 1%) van de totale hoeveelheid zoet water is (5.695 miljoen m³) kan dit wel lokaal nadelig zijn voor bijvoorbeeld de drinkwaterwinningen, gezien het zoet-zout grensvlak zich omhoog gaat verplaatsen.



Figuur 10 Totale hoeveelheid zoet grondwater (concentratie <= 0,15 g/L) op Terschelling Voor referentie, Hn, en Hd, voor de periode 2023-2105.

3.1.2 Inzichten per deelgebied

Om verder inzicht te krijgen in de effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging en de toekomstige uitdagingen die te verwachten zijn is ingezoomd op de resultaten voor deelgebieden duinen, duinrand en polder. Tabel 8 biedt een overzicht van de verschillende deelgebieden en de verwachte impact van de scenario's voor de jaren 2050 en 2100. Een "-" duidt op een afname ten opzichte van de referentie, een "+" op een toename, en een "0" op geen of een minimale verandering. Met de term "droogte" wordt hier lage(re) grondwaterstanden mee bedoeld en de term "wateroverlast" wordt gebruikt voor hoge(re) grondwaterstanden ten opzichte van referentie.

De gevolgen voor het eiland zijn niet uniform verdeeld. In de duingebieden zal vooral wateroverlast door hogere grondwaterstanden vaker voorkomen. In de poldergebieden zullen de omstandigheden zouter en in de zomer droger worden, met lagere grondwaterstanden. De duinrand wordt gekarakteriseerd door een toename van kwel en een sterke afname van de diepte van het grensvlak. In de volgende paragrafen worden de effecten per deelgebied in detail besproken.

Tabel 4 Overzicht impact van klimaatverandering en zeespiegelstijging op de deelgebieden (duinen, duinrand, en polder) voor de scenario's Hd en Hn ten opzichte van de referentie voor 2050 en 2100. Geen verandering (0), toename (+), en afname (-). *Afname van de diepte van het grensvlak betekent krimp van de zoetwaterbel.

		2050		2100	
		Hd	Hn	Hd	Hn
Duinen	Diepte grensvlak*	--	-	---	--
	Droogte (GLG)	-	--	--	---
	Wateroverlast (GHG)	+	++	++	+++
	Kwel	0	0	0	0
Duinrand	Diepte grensvlak	--	-	---	--
	Droogte (GLG)	0	-	-	--
	Wateroverlast (GHG)	0	+	+	++
	Kwel	+	+	++	++
Polder	Diepte grensvlak	-	-	--	--
	Droogte (GLG)	++	+	+++	++
	Wateroverlast (GHG)	0	0	0	+
	Kwel	+	+	++	++

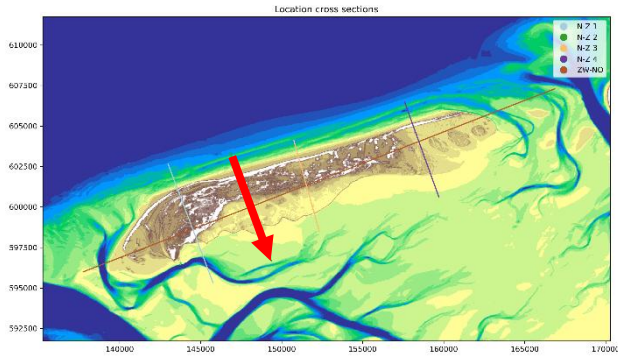
3.1.2.1 Duinen

De voornaamste impact van klimaatverandering en zeespiegelstijging in het duingebied is de toename van de grondwaterstanden, als gevolg van de toenemende neerslag en stijgende zeespiegel. Deze toename is sterker in het natte scenario (Hn) dan in het droge scenario (Hd), maar in beide gevallen is er sprake van een stijging. Met name in de winter is er een duidelijke toename van de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG), maar ook de gemiddeld lage grondwaterstand (GLG) stijgt doordat het grondwatersysteem van de duinen een trager systeem is met weinig afvoermogelijkheden en door de zeespiegelstijging.

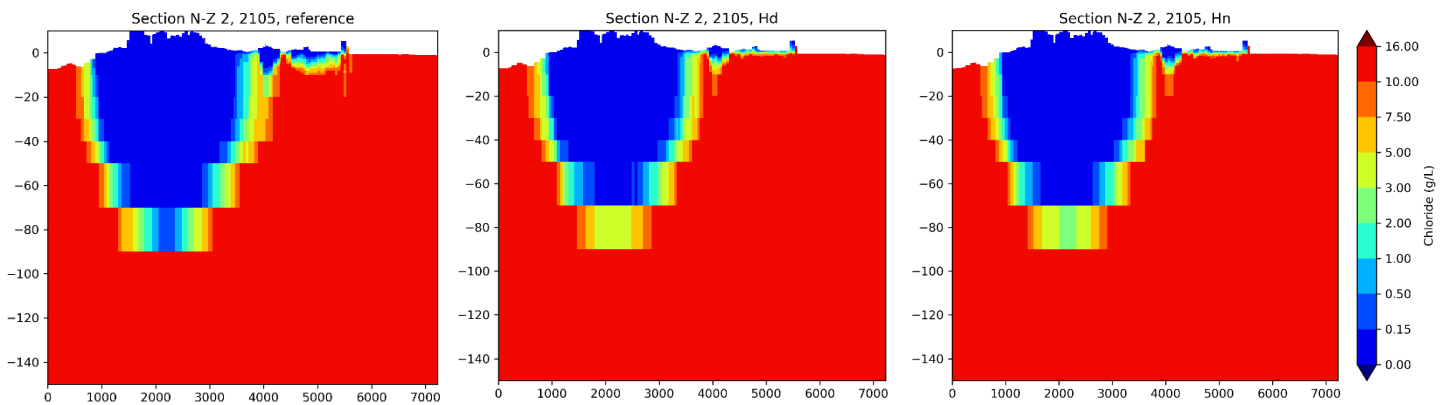
Tot 2050 stijgt de GHG in de duinen in het droge scenario met ongeveer 0,1-0,25 m. In het natte scenario kan deze toename oplopen tot 0,25-0,5 meter. Tegen het jaar 2100 wordt een verdere toename verwacht. In het natte scenario kan de GHG dan maximaal 0,5-1,0 meter stijgen en lokaal zelfs meer dan 1 meter. Ook de laagste grondwaterstanden (Figuur 6, GLGs), die vooral in de zomer relevant zijn, laten in de duinen over het algemeen een stijging zien. Uitzondering hierop is de Boschplaat, waar in het droge scenario juist een verlaging van de GLGs zichtbaar is. Hierbij wordt opgemerkt dat dit mogelijk wordt veroorzaakt door de aanname dat alle neerslag in dit gebied infiltreert (Vermeulen et al., 2025), wat voor deze randgebieden niet volledig correct is. Dit gebied valt echter buiten de focus van de huidige studie.

Naast de stijging van de grondwaterstanden zal de dikte van de zoetwaterlens aanzienlijk afnemen, wederom als gevolg van de zeespiegelstijging. Door de toenemende druk van de hogere zeespiegel wordt de zoetwaterlens omhoog gedrukt, wat leidt tot hogere grondwaterstanden en een kleinere zoetwaterlens. Volgens de Badon-Ghyben-Herzberg-verhouding zou een stijging van de grondwaterstand normaal gesproken resulteren in een dikkere zoetwaterlens. Door de sterke druktoename als gevolg van de zeespiegelstijging

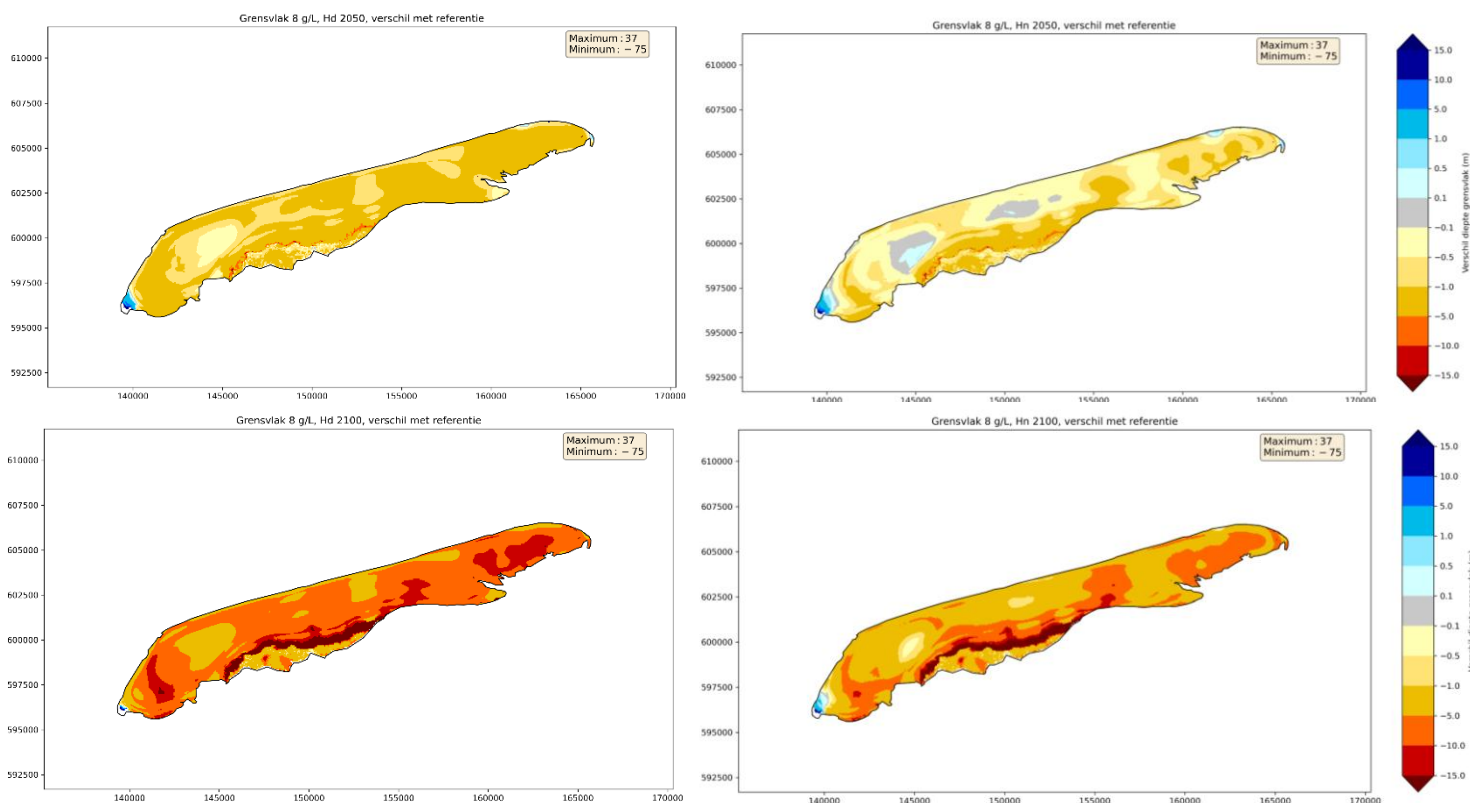
gebeurt hier juist het tegenovergestelde: het grensvlak tussen zoet en zout water komt hoger te liggen en de grondwaterstanden stijgen verder. De zoetwaterbel wordt als het ware opgetild en afgetopt (gedraineerd) aan de bovenzijde. Figuur 12 laat een dwarsdoorsnede door de duinen zien en daarin is te zien dat in zowel Hd als Hn de diepte tot waar de zoetwaterlens komt afneemt. Figuur 13 laat de verandering van de diepte van het 8 g/L grensvlak zien. Rode kleuren betekenen dat het grensvlak omhoog komt en dat de dikte van de zoetwaterlens dus afneemt. In beide scenario's neemt de diepte van het grensvlak af, in Hd is de afname groter dan in Hn. In de duinen is voor Hd is de afname ongeveer 1-5 meter in 2050 en 5-10 meter in 2100. In Hn is de afname iets kleiner en zijn er in 2050 ook plekken waar het grensvlak gelijk blijft of lichtelijk toeneemt. In 2100 neemt ook voor Hn de diepte van het grensvlak af met ongeveer 1-5 meter.



Figuur 11 Locatie dwarsdoorsnede door de duinen en polder.



Figuur 12 Dwarsdoorsnede door de duinen en polder met chloride concentratie (g/L) voor referentie (link), Hd (midden), en Hn (rechts) voor het jaar 2105.

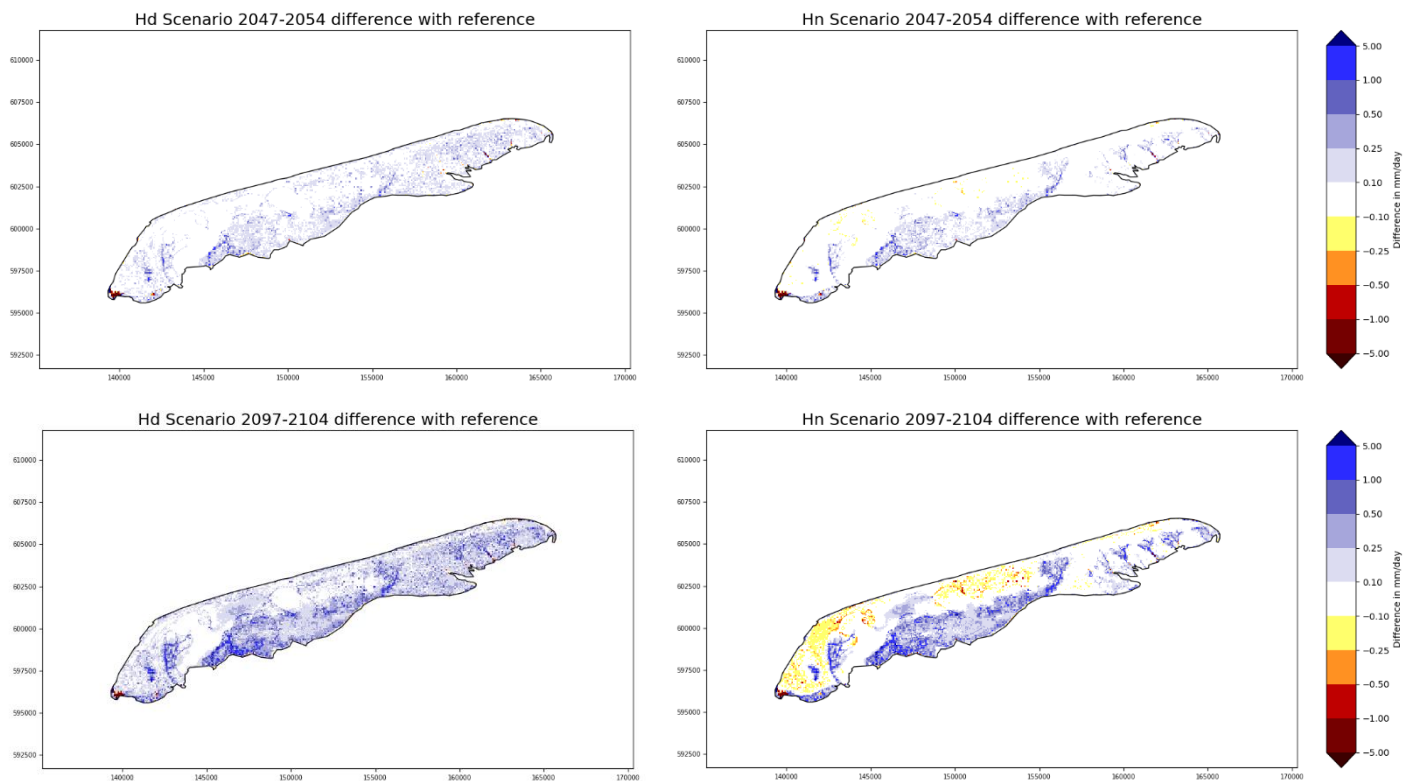


Figuur 13 Verschil (verandering) in diepte van het 8 g/L grensvlak tussen de Hd (links), Hn (rechts) en de referentie. Rode kleuren geven aan dat de diepte van het grensvlak afneemt ten opzichte van de referentie en blauw dat de diepte van het grensvlak toeneemt.

3.1.2.2 Duinrand

De grootste impact voor de duinrand is de verandering van kwel. Figuur 14 laat het verschil in hoeveelheid kwel op -0,5 mNAP zien tussen de scenario's en de referentie. In de gehele polder stijgt de kwel in zowel Hd als Hn. De stijging in kwel is het grootst in het zuidwesten van de polder en in de duinrand. Tot 2050 is de stijging over het algemeen maximaal 0,1-0,25 mm/dag. In 2100 loopt dit in het zuidwesten van de polder op tot 1.0-5.0 mm/dag en in de duinrand 0,5-1,0 mm/dag.

In de duinrand is de verandering van de diepte van het grensvlak het grootst (Figuur 13). Hier neemt in 2100 voor zowel Hd als Hn de diepte van het grensvlak af met meer dan 15 m. Dit komt doordat dit de zijkant is van de grote zoetwaterlens onder de duinen, en deze in breedte afneemt (ook te zien in Figuur 12).



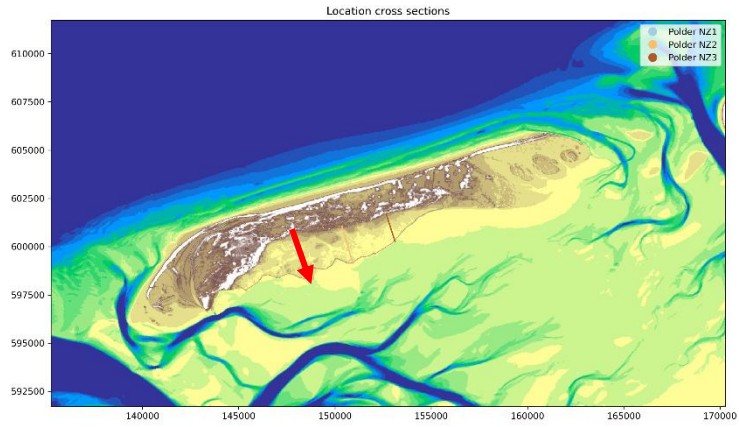
Figuur 14 Verschil in hoeveelheid kwel op een diepte van -0,5 mNAP tussen referentie en respectievelijk Hd (links) en Hn (rechts). Blauw (positieve getallen) geven een toename van kwel aan en rood (negatieve getallen) een afname van de kwel. Gemiddeld voor de periode 2047-2054 (boven) en 2097-2104 (onder).

3.1.2.3 Polder

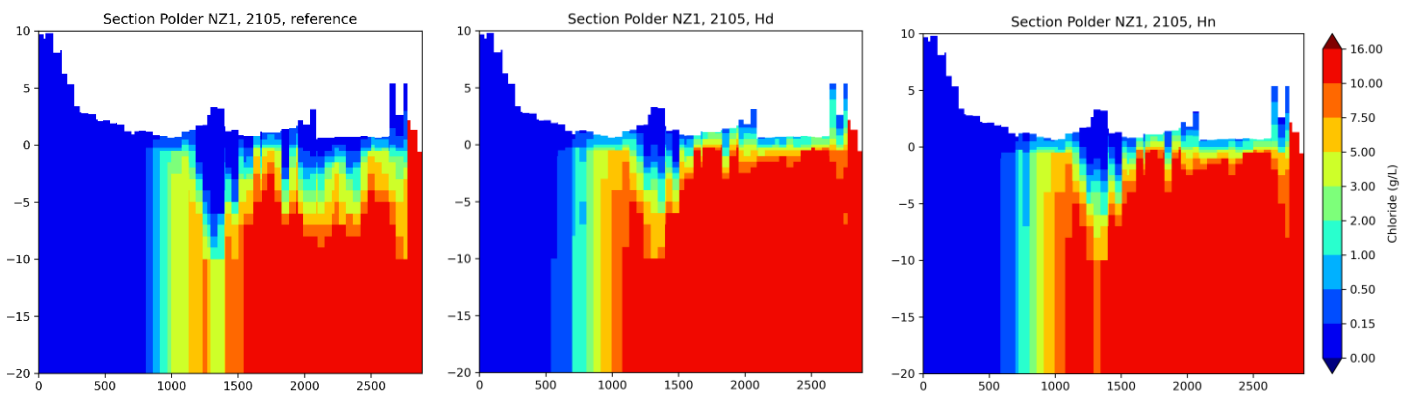
De hoeveelheid afvoer bij de sluisen zal in de toekomst veranderen als gevolg van klimaatverandering. Figuur 8 toont de totale afvoer van Kinnum in 2050 en 2100, terwijl Figuur 9 de afvoer van Liessluis in dezelfde jaren laat zien. Gemiddeld genomen zal de afvoer bij beide sluisen toenemen (zie Tabel 3). Daarnaast zullen er in de zomer vaker lagere grondwaterstanden voorkomen ten opzichte van de referentieperiode (zie Figuur 6, GLGs). Dit patroon is zichtbaar in zowel het natte als het droge scenario, maar de daling is sterker in het droge scenario. In 2100 zijn de grondwaterstanden in Hd enkele decimeters lager, met maximale dalingen tussen 25 en 50 cm. Vooral in het oosten van de polder zullen de grondwaterstanden aanzienlijk lager worden.

In de winter lijkt de impact op de grondwaterstanden relatief beperkt. Zoals Figuur 5 laat zien, is er tijdens natte periodes slechts een kleine verhoging van de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG), maximaal 0,1-0,25 meter in 2100 voor het natte scenario. Dit komt doordat de polder gedraineerd wordt, wat voorkomt dat de grondwaterstanden te sterk stijgen. Verder toont Figuur 14 een toename van de kwel in de polder, vooral in het zuidwesten en langs de duinrand. Deze kwelverandering is al in meer detail beschreven in de paragraaf over de duinrand, waar de specifieke effecten voor dit gebied worden besproken.

In de polder is de afname van de zoetwaterlens aanzienlijk. Dit is te zien in Figuur 13 en Figuur 16. De dunne zoetwaterlens zijn in de polder overwegend enkele meters dik en nemen af met 1 - 5 meter. Hier bestaat dus het risico dat het zoete grondwater in de percelen lokaal verdwijnt gedurende een deel van het jaar. Door de toename van zoute kwel zal ook het zoutgehalte in de sloten toenemen.



Figuur 15 Locatie dwarsdoorsnede door de polder.



Figuur 16 Dwarsdoorsnede door de polder met chloride concentratie (g/L) voor referentie (link), Hd (midden), en Hn (rechts) voor het jaar 2105. Voor de locatie van de dwarsdoorsnede zie Figuur 15.

4 Implicaties voor stakeholders en functies

In het project zijn bijeenkomsten georganiseerd en individuele gesprekken gevoerd met de verschillende partners om de visies, bedreigingen, kansen en wensen gerelateerd aan het watersysteem op te halen. In dit hoofdstuk worden de modelresultaten per functie beschouwd ten opzichte van de opgehaalde wensen over het huidige en toekomstige watersysteem.

4.1.1 (Melk)veehouders in de polder

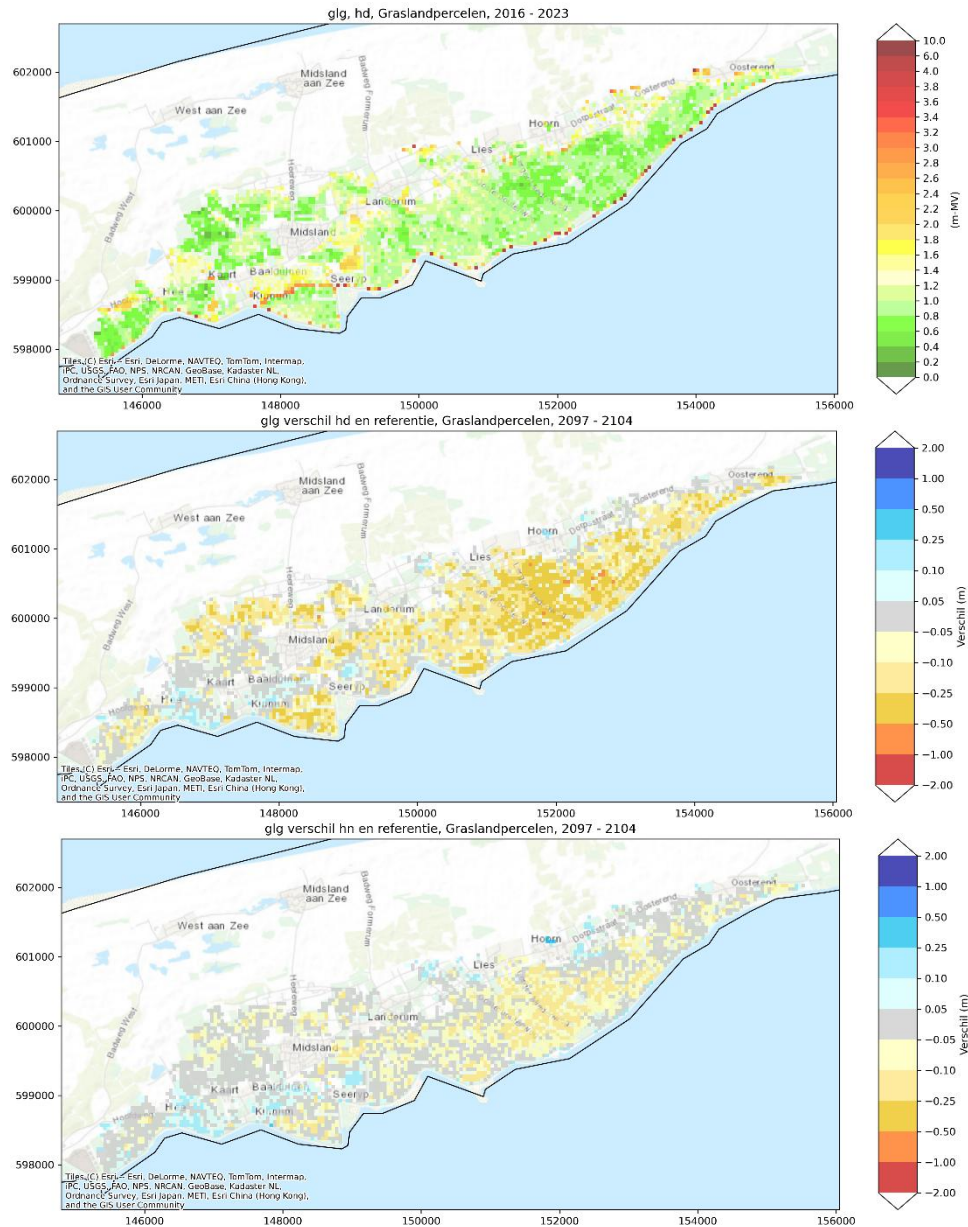
Visie	Voldoende grasgroei van goede kwaliteit. Agrarisch natuur/weidevogelbeheer. Behoud weidegang.
Bedreigingen	Zoute sloten op locaties waar koeien uit sloten drinken. Droogte als beperking voor weidevogels en grasgroei.
Kansen	Weidevogels als inkomstenbron, met name aan zuidkant polder op mindere kwaliteit grond. Droogte/zoutresistente grasgewassen.
Wensen watersysteem	Voldoende drooglegging t.b.v. grasgroei en weidevogels. Zoet bovenste grondwater. <ul style="list-style-type: none">• Voorjaars grondwaterstand (GVG) van >0,30 m-maaiveld,• Zomer grondwaterstand (GLG) <0,80 m-maaiveld• Chlorideconcentratie in het bovenste grondwater <1 g/L

De grootste uitdaging voor de (melk)veehouderij ligt in verminderde grasopbrengst als gevolg van droogte- en zoutschade. De huidige berekende zomergrondwaterstanden (GLG) liggen in de polder gemiddeld op circa 1,1 m-maaiveld, met variatie tussen circa 0,7 en 1,5 m-mv (10 en 90 percentielen). Diepere zomergrondwaterstanden komen met name voor op de hoger gelegen delen in de polder (oude strandwallen) bijvoorbeeld ten zuiden van Midsland (Figuur 17). Hogere grondwaterstanden komen voor op de percelen ten zuiden van Kooibosjes en het gedeelte van de polder ten oosten van Lies.

Over het algemeen wordt slechts een kleine verandering van de huidige grondwaterstanden verwacht, doordat het oppervlaktewaterpeil in de polder sterk gereguleerd is (Tabel 5). Een stijging van de grondwaterstanden zal in de polder beperkt zijn door de aanwezige afwatering. Tot 2100 wordt een stijging van circa 3 tot 6 centimeter verwacht, met een iets hogere stijging in het zuiden van de polder.

Veranderingen zijn groter in de lage zomergrondwaterstanden (Tabel 5). Tot 2050 verandert de GLG beperkt, richting 2100 is de verwachting dat deze met 3 tot 14 cm zal dalen. De verandering is echter afhankelijk van de ligging in het systeem. Op de hogere delen ten zuiden van Midsland zal de grondwaterstand juist stijgen door meer neerslag jaarrond en hogere kweldruk, vergelijkbaar met de veranderingen in de duinen (Figuur 17). Het gaat in de polder dan om een beperkte stijging van 5 tot 25 cm. In de rest van de polder dalen de GLGs als gevolg van drogere zomers. Deze veranderingen zijn het grootst in het deel van de polder ten zuiden van Lies en Hoorn, waar een daling van de zomergrondwaterstand kan worden verwacht van 10 tot 50 cm. Wat in deze gemiddelde resultaten minder duidelijk naar voren komt is dat de verwachting is dat extremen zullen toenemen met zowel nattere perioden en piekbuien als langdurigere droge perioden. Dit kan zorgen voor langdurigere perioden met hoge danwel lage grondwaterstanden.

Als gevolg van de gemiddeld lagere grondwaterstanden gecombineerd met een hogere kweldruk door zeespiegelstijging zal het zoet-zout grensvlak ondieper komen te liggen. De zoete regenwaterlenzen in de percelen zullen hierbij krimpen en het risico dat deze in droge perioden verdwijnen neemt toe. Ook schuift de grens in de polder tussen het gebied met zoete kwel en zoute kwel op richting het noorden, waardoor verzilting op meer locaties een probleem kan worden.



Figuur 17 Huidige Gemiddeld Lage Grondwaterstanden (GLGs) geven een indicatie van zomergrondwaterstanden (boven). Veranderingen in 2100 zijn weergegeven voor het Hd scenario (midden) en Hn scenario (onder). Positieve waarden betekenen een stijging van de grondwaterstand.

Tabel 5 De gemiddelde GHG, GLG, GVG voor graslandpercelen in de polder voor de huidige situatie en verandering in 2050 en 2100 (Hd en Hn). Een positief getal betekent dat de grondwaterstand omhoog komt, een negatief getal betekent een daling.

	Huidig m-mv	2050 Δcm	2100 Δcm
GHG	0,46	0 / 2	3 / 6
GLG	1,08	-2 / -7	-3 / -14
GVG	0,66	1 / 2	4 / 6

4.1.2 Agrarisch natuurbeheer in de polder

Visie	Handhaven en verbeteren weidevogelstand en botanisch rijke gebieden. Handhaven morfologie van slenkenpatronen.
Bedreigingen	Intensiever landgebruik (waterpeil, waterkwaliteit), verzilting.
Kansen	Samenwerking met boeren. Zonering in polder: verbeteren plekken met weidevogels, andere plekken meer focus op grasgroei.
Wensen watersysteem	Hoger grondwaterpeil maar geen inundatie. <ul style="list-style-type: none"> • Voorjaars grondwaterstand (GVG) van >0,30 m-maaiveld, • Zomer grondwaterstand (GLG) <0,80 m-maaiveld Chlorideconcentratie in het bovenste grondwater <1 g/L

De modelresultaten die van belang zijn voor het agrarisch natuurbeheer in de polder zijn gelijk aan die van de (melk)veehouders in de polder. De GLGs nemen gemiddeld af, met grootste afname in het oosten van de polder (enkele decimeters). Vaker voorkomende en langer durende droge periodes zorgen voor verminderde voedselbeschikbaarheid voor weidevogelkuikens.

4.1.3 Recreatie in de duinrand

Visie	Jaarrond recreatie en dus jaarrond droge voeten. Voldoende drinkwater.
Bedreigingen	Toename neerslag, toename kwel. Verdroging van grasvelden.
Kansen	Gebruik kwelwater als drinkwater: droge voeten & drinkwaterproductie.
Wensen watersysteem	GHG >0,30 m-maaiveld GVG >0,30 m-maaiveld GLG <1,50 m-maaiveld Kwelflux

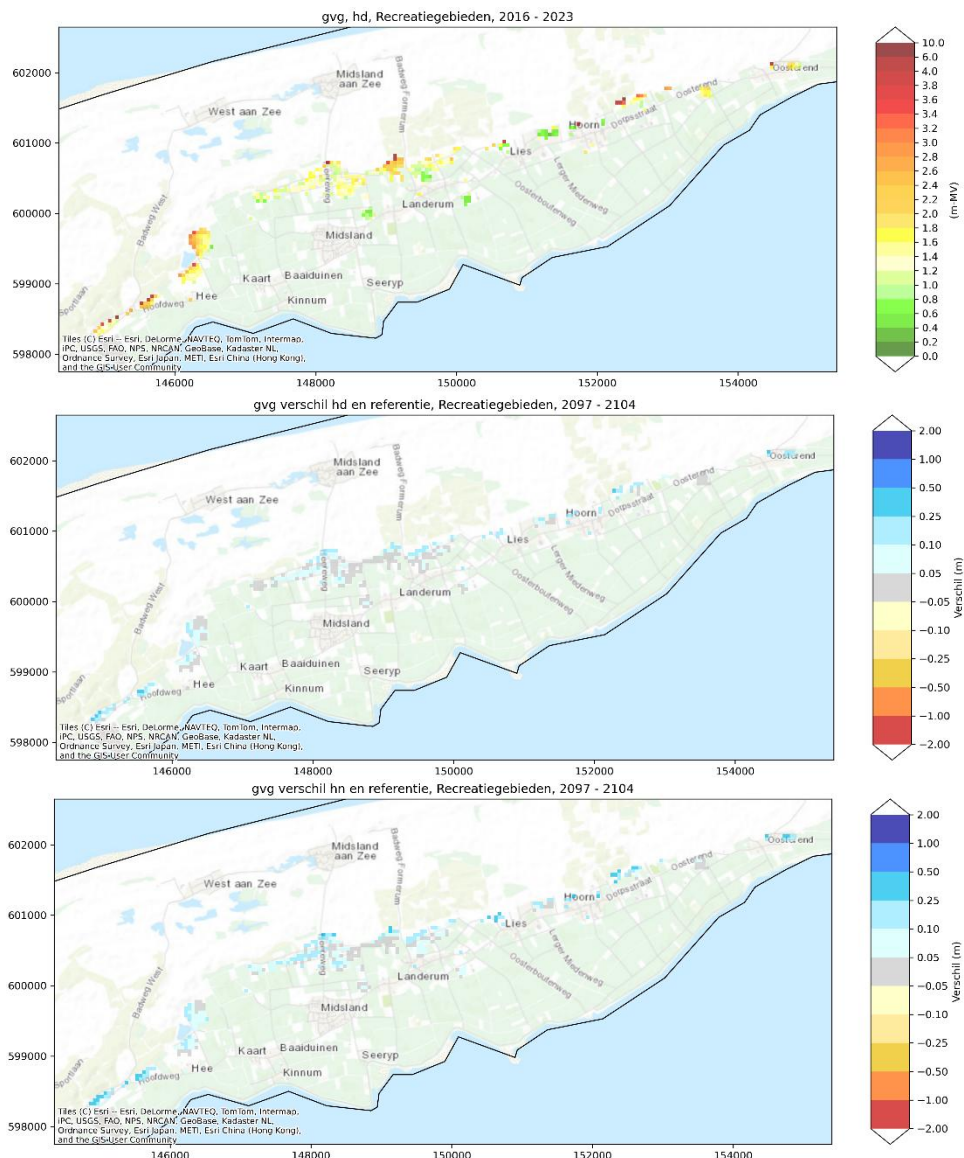
Grootste uitdaging voor de recreatieterreinen in de duinrand zit in (grond)wateroverlast. Op veel locaties komt hoge kweldruk voor vanuit het hoger gelegen duingebied. Dit zorgt voor hoge grondwaterstanden en drassigheid op de terreinen. Dit komt met name voor in het voorjaar na een natte winter maar ook bij piekbuien op andere momenten doordat het water dan niet goed weg kan zakken.

Tabel 6 geeft de huidige gemiddelde grondwaterstanden en de berekende veranderingen tot 2050 en 2100. Hieruit blijkt dat de grondwaterstanden in de duinrand tot 2050 gemiddeld met enkele centimeters stijgen en tot 2100 met ongeveer 10 cm. Omdat deze waarden gemiddeld zijn voor alle recreatiegebieden, geven deze een enigszins vertekend beeld: om sommige

locaties is de stijging beperkt terwijl op andere locaties grotere stijgingen worden verwacht (Figuur 18).

Uit de berekeningen komt ook naar voren dat de kwelfluxen gaan toenemen. Wanneer kwel toeneemt zal er meer water door de aanwezige drainage en greppelsystemen stromen. Enkele gebieden waar nu gemiddeld wegzijging plaatsvindt veranderen in gebieden waar kwel overheerst. Deze omslag is met name zichtbaar voor de recreatiegebieden ten noorden van Midland en Landerum.

Omdat het maaiveld in de duinrand over korte afstand verschilt, worden de lokale effecten sterk beïnvloed door de celgrootte van het model (50 x 50m). Daarnaast is de aanwezigheid van de buisdrainage in het model belangrijk, omdat dit de berekende stijging van grondwaterstanden beperkt. De resultaten voor dit gebied geven een vernattende trend aan met hogere grondwaterstanden en hogere kwelfluxen. Lokaal zijn de resultaten minder betrouwbaar, en zou een modelberekening moeten worden gedaan met meer detailniveau (o.a. kleinere celgrootte, gedetailleerd maaiveld, drainage en greppelsysteem).



Figuur 18 Huidige Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstanden (GVGs) op de recreatieterreinen (boven). Veranderingen in 2100 zijn weergegeven voor het Hd scenario (midden) en Hn scenario (onder). Positieve waarden betekenen een stijging van de grondwaterstand.

Tabel 6 De gemiddelde GHG, GLG, GVG voor de recreatieterreinen voor de huidige situatie en verandering in 2050 en 2100 (Hd en Hn). Een positief getal betekent dat de grondwaterstand omhoog komt, een negatief getal betekent een daling.

	Huidig m-mv	2050 Δcm	2100 Δcm
GHG	1,51	1 / 3	7 / 12
GLG	1,82	0 / 2	3 / 7
GVG	1,64	2 / 3	7 / 10

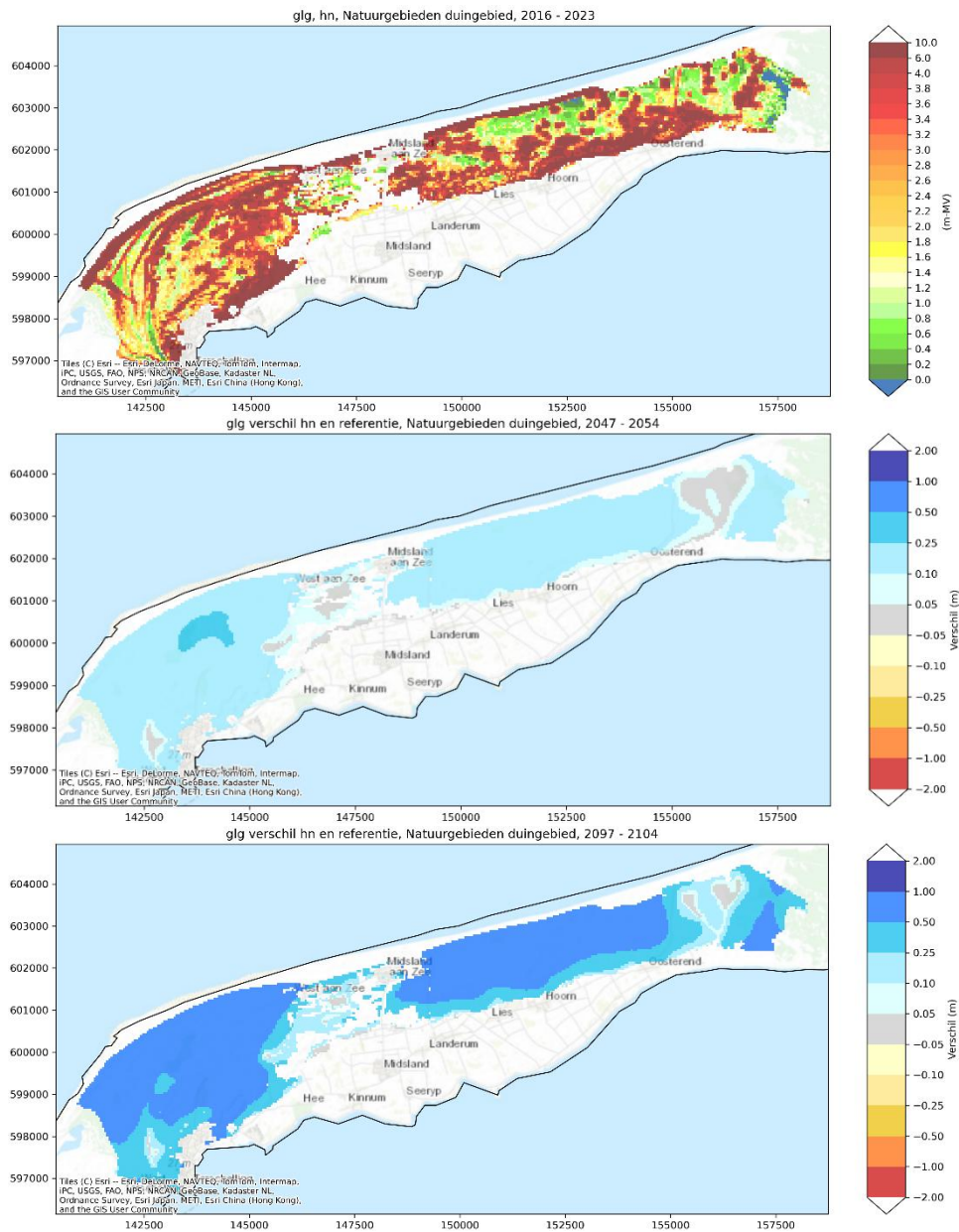
4.1.4 Natuur in de duinen

Visie	Behoud N2000 habitats. Water vasthouden. Natuurlijke processen en maatregelen.
Bedreigingen	Relatie met functies in duinrand.
Kansen	Zoetwatervoorziening vergroten.
Wensen watersysteem	GHG, GVG, GLG wisselend afhankelijk van natuurtype

De grondwaterstanden zullen in de natuurgebieden in de duinen in de toekomst sterk toenemen in de doorgerekende scenario's, voor zowel de GHG, GLG en GVG (Tabel 7). Dit wordt veroorzaakt door zowel een toename in jaarlijkse neerslag als de stijgende zeespiegel. In 2050 wordt een gemiddelde stijging van 10 tot 20 cm verwacht, in 2100 loopt dit op tot 30 tot 65 cm. De afwateringssystemen in de duinen bij West aan Zee en ten noordoosten van Oosterend zijn duidelijk zichtbaar: doordat het waterpeil op deze locaties wordt gereguleerd stijgt de grondwaterstand hier niet of beperkt.

Tabel 7 De gemiddelde GHG, GLG, GVG voor het duingebied voor de huidige situatie en verandering in 2050 en 2100 (Hd en Hn). Een positief getal betekent dat de grondwaterstand omhoog komt, een negatief getal betekent een daling.

	Huidig m-mv	2050 Δcm	2100 Δcm
GHG	2,91	11 / 20	41 / 65
GLG	3,63	8 / 16	30 / 51
GVG	3,05	12 / 20	40 / 62



Figuur 19 Huidige Gemiddelde Lage Grondwaterstanden (GLGs) in het duingebied (boven). Veranderingen in 2100 zijn weergegeven voor het Hd scenario (midden) en Hn scenario (onder). Positieve waarden betekenen een stijging van de grondwaterstand.

4.1.5 Drinkwaterwinning

Visie	Voldoen aan de watervraag. In toekomst zelfvoorzienend door alternatieve bronnen op het eiland als vervanging van wadleiding.
Bedreigingen	Wegvallen wadleiding. Krimp zoetwaterbel door zeespiegelstijging.
Kansen	Winning in duinrand om wateroverlast tegen te gaan. Slim zoet/brak water onttrekken onder de polder in de winter. Afvangen afstroming oppervlaktewater in duinen voor opvangen in duinen.
Wensen watersysteem	Diepte grensvlak voldoende diep om drinkwaterwinning niet te bedreigen en eventuele uitbreiding mogelijk te maken

Hoewel de grondwaterstanden in de duinen hoger komen te liggen, neemt de diepte van het grensvlak in de duinen af. Het ondieper worden van het grensvlak is een gevolg van de zeespiegelstijging. Ter hoogte van de drinkwaterwinningen neemt het grensvlak richting 2100 af met ongeveer 5 meter in het droge scenario (Hd) en 3 meter in het natte scenario (Hn).

5 Conclusies

Met het grondwatermodel van Terschelling zijn de effecten van klimaatverandering en zeespiegelstijging doorgerekend voor de periode tot 2100. Er is gebruik gemaakt van de nieuwste inzichten van het KNMI (KNMI, 2023). In deze studie ligt de focus op de scenario's Hd (verdrogend klimaat met hoge uitstoot) en Hn (vernattend klimaat met hoge uitstoot). Berekeningen van deze scenario's worden vergeleken met een referentieberekening waarbij geen veranderingen in klimaat en zeespiegel zijn opgenomen.

Op de korte termijn, tot 2050, hebben veranderingen in neerslagpatronen de grootste invloed op het grondwatersysteem:

- In de duinen stijgen de grondwaterstanden (GHG) tijdens natte periodes (gemiddeld 10-20 cm), terwijl de impact op de polder beperkter blijft door de aanwezige afwatering (gemiddeld 0-2 cm). Lokaal zijn stijgingen (veel) groter.
- Tijdens droge periodes (GLG) dalen de grondwaterstanden echter vooral in de polder (gemiddeld 2-7 cm). Lokaal kan dit voor problemen zorgen.
- De afvoer bij de sluisen neemt over het jaar gezien toe, waarbij de seizoen verschillen groter worden: de afvoer neemt toe in de winter en af in de zomer.

Op de lange termijn, richting 2100, zal de stijgende zeespiegel een steeds dominantere rol spelen in de veranderingen van het grondwatersysteem:

- De grondwaterstanden in de duinen stijgen aanzienlijk (gemiddeld circa 0,5m maar lokaal 1 tot 2m) door de toenemende druk die de zeespiegelstijging op het grondwatersysteem uitoefent.
- Tegelijkertijd krimpt hierdoor de zoetwaterbel in het duingebied. De totale hoeveelheid zoet grondwater (met een zoutgehalte lager dan 0,15 g/L) neemt in 2100 af met ongeveer 33 miljoen m³ in het Hn-scenario en met circa 53 miljoen m³ in het Hd-scenario.
- Grondwaterstanden en kwel in de duinrand nemen verder toe.
- In de polder komen de aanwezige dunne regenwaterlenzen onder druk te staan, waardoor op meer locaties problemen met verzilting kunnen ontstaan.

Effect op stakeholders

De veranderingen in het watersysteem hebben effect op de stakeholders in de verschillende gebieden. De natuur in de duinen zal met name in de lager gelegen duinvalleien hinder ondervinden van de nattere omstandigheden. Op locaties zonder afwatering zal gedurende de winter vaker (langdurige) inundatie kunnen voorkomen. Hoewel hogere grondwaterstanden in de duinen in principe gunstig zijn voor de drinkwaterwinning, vormt de krimp van de zoetwaterbel een bedreiging. Recreatieterreinen in de duinrand krijgen meer en vaker last van hoge grondwaterstanden, maar dit kan zeer lokaal zijn afhankelijk van o.a. hoogteligging en afwatering (greppels, drainage). In de polder zijn met name de dalende grondwaterstanden in de zomer en het krimpen van de zoete regenwaterlenzen een bedreiging voor de grasgroei van de (melk)veehouders en de voedselbeschikbaarheid voor weidevogels.

6 Literatuur

KNMI, 2023: KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03.

Vermeulen, P. T. M., & Roelofsen, F. J. (2022). Imod version 5.4 [Software] (Tech. Rep.). Deltares.

Vermeulen, P.T.M., Davids, A.M., Pouwels, J.R., de Louw, P.G.B. en V.P. Kaandorp (2025). Terschelling grondwatermodellering: Modelopzet en validatie. Deltares rapport.

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

Deltares

www.deltares.nl