



Effecten zeespiegelstijging voor het beheer van zoet grond- en oppervlaktewater

Deze Deltafact behandelt de oorzaken en effecten van een stijgende zeespiegel op het beheer van het grond- en oppervlaktewater op regionale schaal in Nederland. Lopende programma's over dit thema worden besproken en er wordt aandacht besteed aan welke kennisvragen openstaan. Bovendien zijn er links naar relevante projecten en is een uitgebreide literatuurlijst met relevante artikelen toegevoegd voor meer informatie.

1. INLEIDING
2. GERELATEERD ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. STRATEGIE
4. SCHEMATISCHE WEERGAVE
5. WERKING
6. KOSTEN EN BATEN
7. RANDVOORWAARDEN
8. GOVERNANCE
9. PRAKTIJKERVARINGEN EN LOPENDE INITIATIEVEN
10. KENNISLEEMTES
12. BRONNEN & LINKS
13. COLOFON
14. DISCLAIMER

1. Inleiding

In dit online kennisdossier wordt op basis van recente literatuur gerichte, actuele, en toegankelijke informatie verstrekt over de processen die leiden tot een zeespiegelstijging en de gevolgen daarvan voor met name de regionale zoetwatervoorziening in de Nederlandse kustgebied in relatie tot verzilting van

grond- en oppervlaktewater. De Deltafact kan waterprofessionals, beleidsmakers en geïnteresseerden helpen om snel up-to-date te blijven en inzichten te verkrijgen op dit dossier.

2. Gerelateerde onderwerpen en deltafacts

Thema's: Waterveiligheid, Zoetwatervoorziening, Ruimtelijke adaptatie,

Deltafacts: [Effecten klimaatverandering op landbouw](#), [Effecten klimaatverandering op terrestrische natuur](#), [Deltascenario's en adaptief deltamanagement](#), [Water en Ruimtelijke Ordening: instrumenten voor betere afstemming](#), [Zoutindringing](#), [Zoetwatervoorziening](#), [Brakke kwel](#), [Zouttolerantie van teelten](#)

3. Strategie

Nederland beschikt over een waardevolle zoetwaterbron in zowel het grond- en oppervlaktewatersysteem, wat van groot belang is voor drinkwater, landbouw, natuur en industrie. Volgens de traditionele zoetwaterstrategie is het de taak van de Nederlandse overheid om voor verschillende gebruikers zo lang en zo veel mogelijk van goed water te voorzien; zo is bijvoorbeeld het waterpeil indien van toepassing aangepast aan de behoeften. Door uit te gaan van de mogelijkheden die het watersysteem en het bodemsysteem bieden, oftewel 'Water en bodem als ordenend principe' in combinatie met de strategieën 'Vasthouden, bergen, afvoeren' en 'Functie volgt peil' kan voor veel gebieden de juiste combinatie van functies worden gekozen. Tijdens perioden van zoetwaterschaarste moeten weloverwogen keuzes worden gemaakt over wie welk water met welke kwaliteit krijgt. Met de nationale verdringingsreeks heeft de overheid een hiërarchie vastgesteld voor de prioriteit van maatschappelijke en economische behoeften bij de toewijzing van beschikbaar oppervlaktewater tijdens periodes van (dreigende) watertekorten ([Kort en Teunis, 2020](#)).

Het stijgen van de zeespiegel en de bodemdaling in grote delen van laag Nederland zetten de traditionele zoetwaterstrategie onder druk omdat zout water het grond- en oppervlaktewater binnendringt, en de betrouwbaarheid van het zoetwateraanbod vanuit de rivieren van Duitsland en België afneemt. Om een betrouwbare zoetwatervoorziening te kunnen blijven garanderen, zijn steeds meer ingrepen nodig, waarbij water en bodem een centrale rol zouden moeten spelen in de plannings- en ontwerpfasen van gebieden.

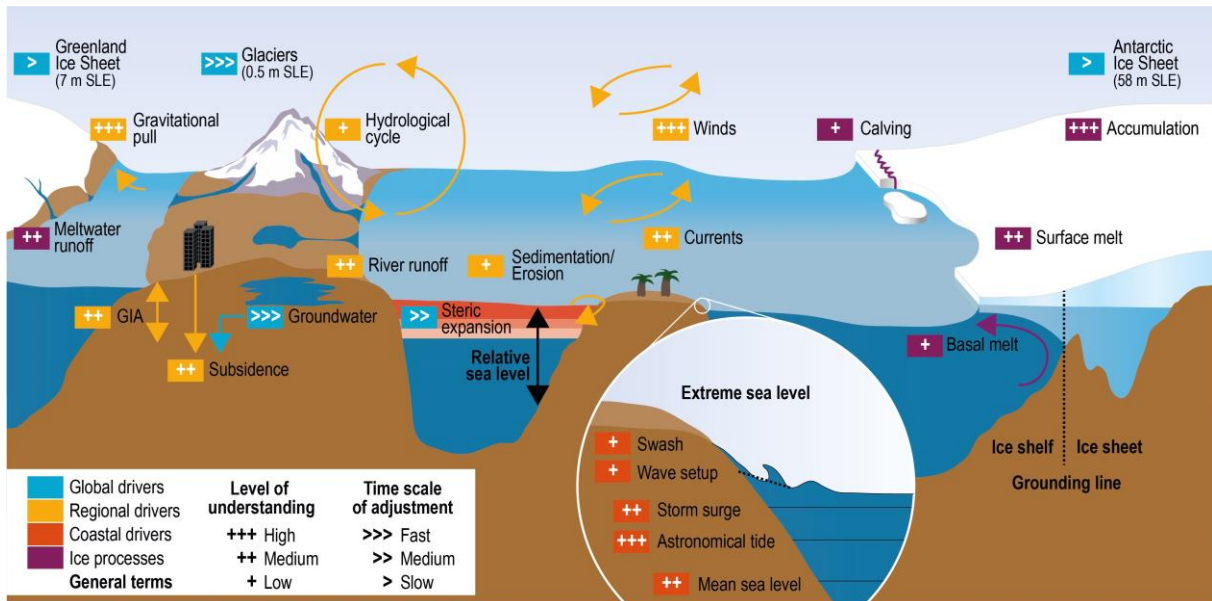
De huidige benadering van waterbeheer is op termijn niet meer houdbaar in een veranderende wereld. Er zijn grenzen aan de maakbaarheid van Nederland (Kamerbrief '[Water en Bodem Sturend](#)', November 2022). De Deltacommissaris beveelt aan om te zorgen voor voldoende, schoon en gezond zoetwater, om de strategische grondwatervoorraden te beschermen ([Leeuwis-Tolboom et al., 2021](#)) en om een transitie van het landelijk gebied en ruimtelijke adaptatie ([Nationaal Programma Landelijk Gebied](#)). De overheid en waterschappen zullen zich blijven inspannen om verziltende kustgebieden van zoetwater te voorzien maar kunnen niet garanderen dat er altijd nieuwe maatregelen genomen worden om (extra) zoetwater van elders aan te voeren. Watergebruikers wordt gevraagd om rekening te houden met (tijdelijke) regionale verzilting en zelf maatregelen te nemen om beter bestand te zijn tegen periodes van extreme droogte, watertekorten en verzilting.

Uitgangspunten die het principe 'Water en Bodem Sturend' vormgeven bij ruimtelijke ontwikkelingen, waarbij de overheid samenwerkt met ondernemers, maatschappelijke organisaties en de inwoners van Nederland om een gezond, veilig en toekomstbestendig zoetwatersysteem van Nederland te realiseren, omvatten onder andere:

- het vermijden van de overdracht van problemen naar toekomstige generaties, andere gebieden of functies, en van privaat naar publiek,
- het versterken van de aanpak bij extreme situaties.
- het in samenhang beheren van wateroverlast, droogte en de bodemkwesties,
- het verminderen van afdekken, vergraven, en verontreinigen,
- het bevorderen van een geïntegreerde aanpak in de leefomgeving.
- het toepassen van het principe 'comply or explain' (pas toe of leg uit), waarbij verantwoording wordt afgelegd wanneer een organisatie niet voldoet aan bepaalde regels.

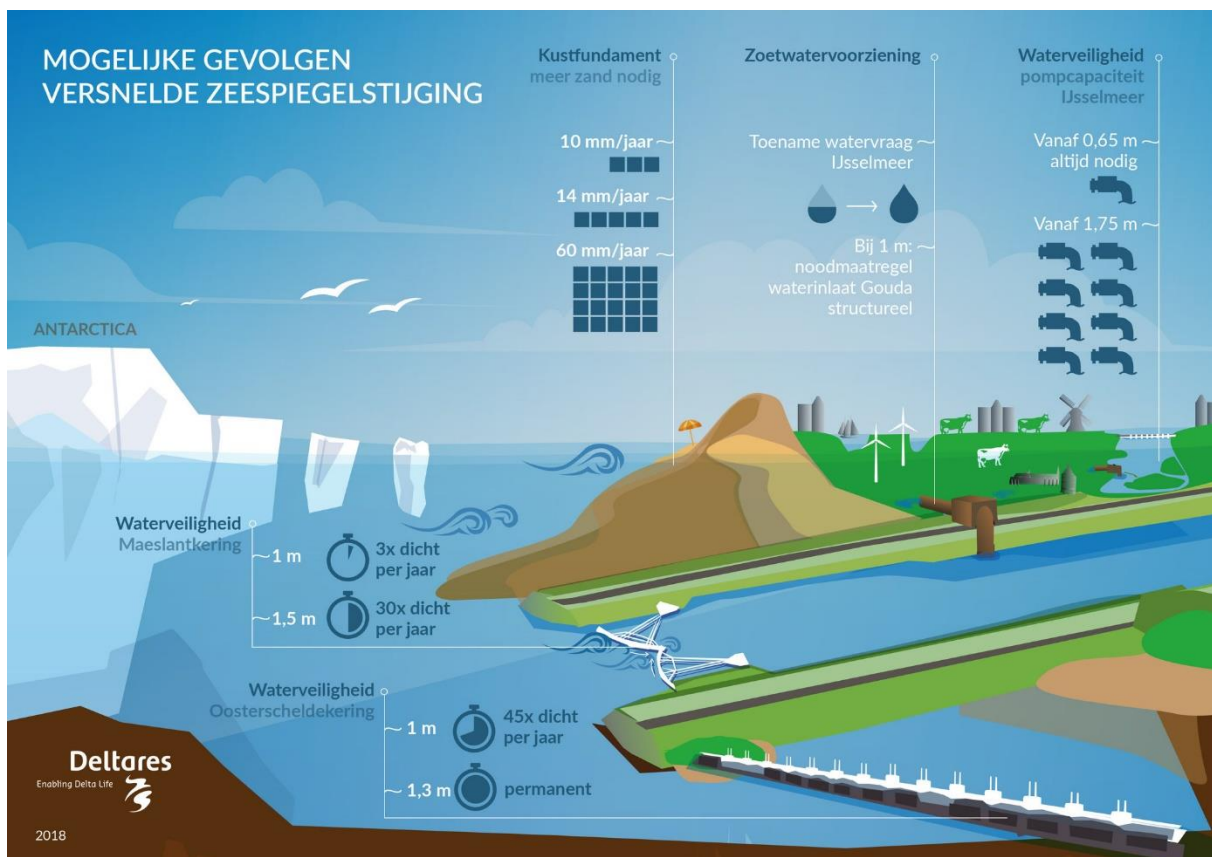
4. Schematische weergave

Oorzaken zeespiegelstijging

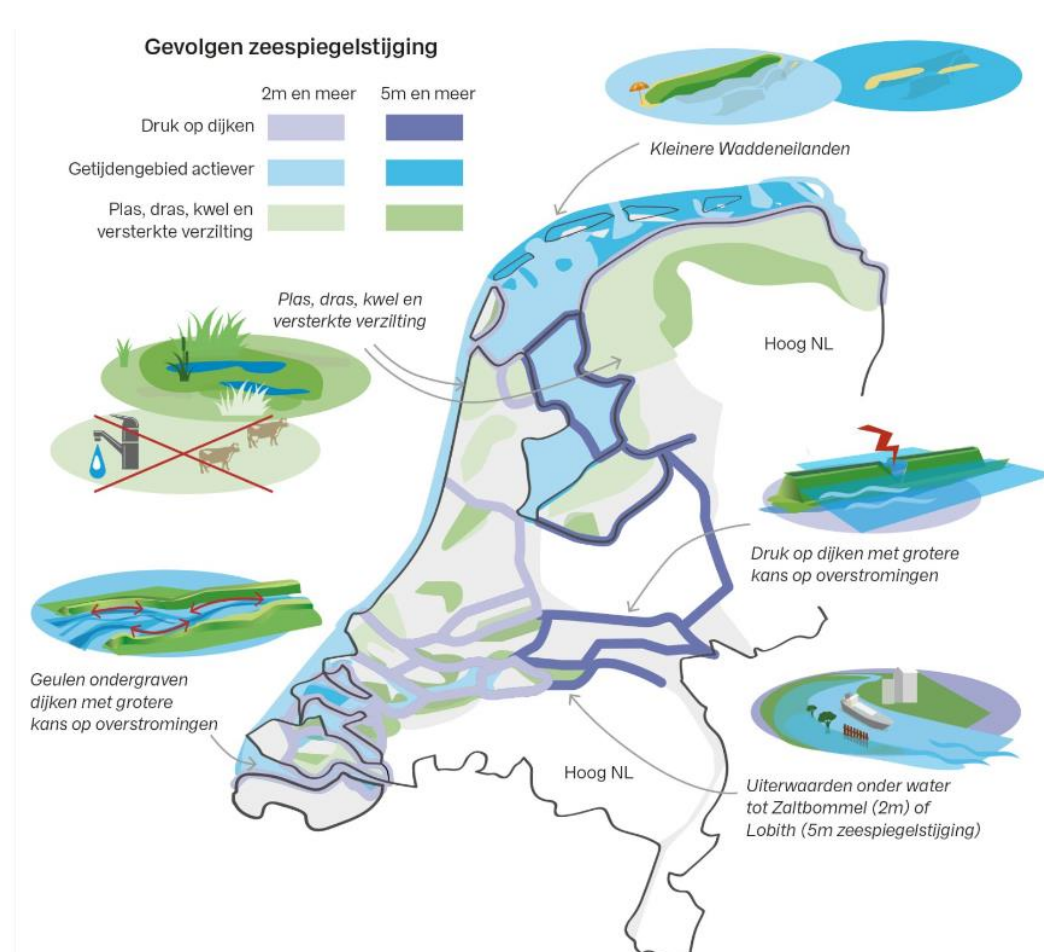


Afbeelding 1 Een schematische illustratie van klimaat- en niet-klimaatgestuurde processen die de wereldwijde, regionale, relatieve en extreme zeespiegelstijging kunnen beïnvloeden. Grote ijsprocessen worden in paars weergegeven terwijl algemene processen in zwart worden getoond. GIA (Glacial-Isostatic Adjustment) verwijst naar de voortdurende beweging van land dat ooit werd belast door gletsjers uit de ijstijd. SLE staat voor Sea Level Equivalent en geeft de toename van de wereldwijde gemiddelde zeespiegel (GMSL) weer wanneer de genoemde ijsmassa volledig smelt en aan de oceaan wordt toegevoegd ([Van den Hurk en Geertsema, 2020](#) en [IPCC](#)).

Mogelijke gevolgen zeespiegelstijging voor de Nederlandse delta



Afbeelding 2 De mogelijke gevolgen van een hoge en versnelde zeespiegelstijging voor de zoetwatervoorziening, kustfundament en waterveiligheid, in de Nederlandse delta (Haasnoot et al., 2019).



Afbeelding 3 Toekomstscenario's voor Nederland bij een zeespiegelstijging van twee en vijf meter. De scenario's wijzen op een verhoogde verzilting en kwel (opwaartse grondwaterstroming), beperktere opties om verzilting tegen te gaan en een groter risico op wateroverlast. Het IJsselmeerpeil moet het zeespiegelpeil volgen, zodat er kan worden gespuid wanneer de pompen niet voldoende zijn. In tegenstelling tot het IJsselmeerpeil hoeft het peil van het Markermeer dit niet noodzakelijk te doen. Dit resulteert in een polderlandschap waarin de waterpeilen in grote binnenwateren en poldervakken nog sterker trapsgewijs zijn dan tegenwoordig (Schra et al., 2022).

5. Werking

5.1. Oorzaken zeespiegelstijging

De stijging van de mondiale zeespiegel wordt voornamelijk veroorzaakt door het verlies van massa van gletsjers en ijskappen op Groenland en Antarctica waardoor er meer water in de zee komt, en de opwarming van het zeewater waardoor het uitzet. Er zijn echter diverse andere factoren die bijdragen aan de zeespiegelstijging, waarvan sommige mondiaal en op lange termijn merkbaar zijn en andere lokaal en op kortere termijn. In een overzichtsrapport (Van den Hurk en Geertsema, 2020) zijn de belangrijkste factoren gegeven voor de gemiddelde zeespiegelstijging

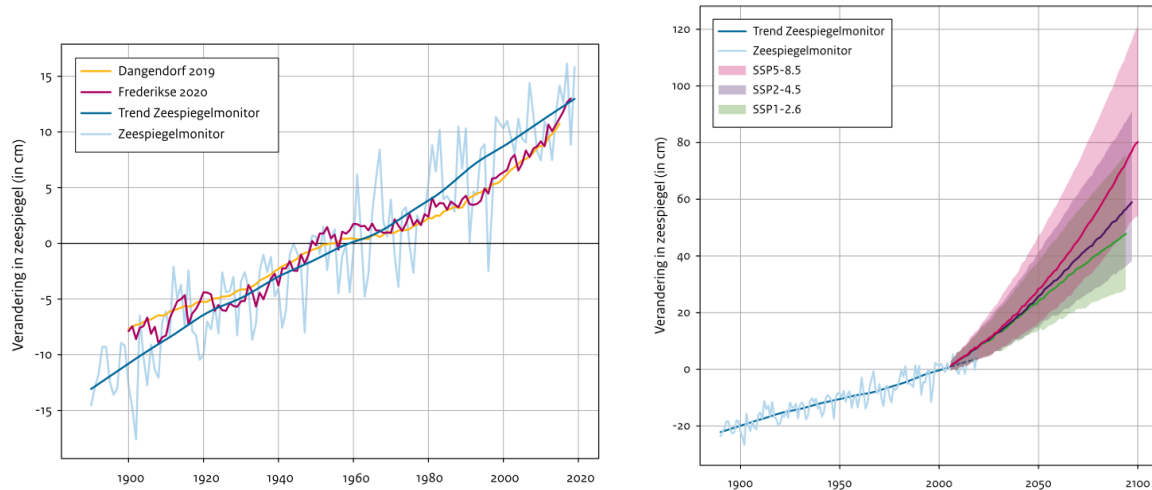
wereldwijd, zie Afbeelding 1. In het rapport worden ook de tijdschalen gegeven hoe lang het duurt voordat het betreffende proces merkbaar wordt in de zeespiegelstijging:

- uitzetting van water door opwarming: mondiaal proces, tijdschaal 10-tallen jaren (39%)
- massaverlies van grote ijskappen: gesmolten ijs herverdeelt zich wereldwijd, zij het niet helemaal evenredig, tijdschaal 10-tallen jaren tot vele eeuwen (34%)
- afsmelten van gletsjers op land, tijdschaal 10-tallen jaren tot eeuwen (17%)
- overige oorzaken: onttrekking van grondwater ([Wada et al., 2012](#)), delfstofwinning, transport van sediment: deze verschillen onderling sterk in tijd, kunnen lokaal grote effecten hebben, en tellen gezamenlijk op tot ongeveer 10% van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging rond 2010

Andere factoren spelen lokaal soms een grote rol maar dragen niet bij aan de wereldgemiddelde zeespiegelstijging:

- lokale bodemdaling: sterk regionaal verschillend, soms 10-tallen mm/jaar ([Erban et al., 2014](#); [Herrera-García et al., 2021](#); [Tay et al., 2022](#));
- stormen, luchtdruk en getij: sterk regionaal verschillend en dynamisch, en kunnen kortstondig (uren tot dagen) voor meters wateropzet zorgen; langjarige cycli van het getij, en variaties in het aantal stormen binnen een jaar kunnen voor significante jaar-tot-jaar variabiliteit zorgen (zie Afbeelding 1);
- oceaanstromingen: hebben (net als het weer) grote fluctuaties en ruimte en tijd, en kunnen lokaal tijdelijke afwijkingen veroorzaken van enkele maanden tot 10-tallen jaren.

Op basis van onder andere satellietmetingen kan worden bepaald dat de bijdrage van de verschillende processen aan de mondiale zeespiegelstijging 3 à 4 mm per jaar is. Hoewel de ijskappen in de afgelopen eeuw weinig hebben bijgedragen, domineren ze de huidige gemeten versnelling in de zeespiegelstijging. Naar verwachting zullen zij een steeds grotere rol spelen in de toekomstige zeespiegelstijging ([DeConto en Pollard, 2016](#); [Van der Wal et al., 2022](#)). In het KNMI rapport ([2021](#)) staat dat de zeespiegel wereldgemiddeld over de periode 1901-2018 met ongeveer 20 centimeter is gestegen, dat deze stijging steeds sneller gaat (tussen 2006 en 2018 gemiddeld 3,7 mm per jaar).



Afbeelding 4 Links: Zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust (blauw gebaseerd op zes getijdstations) versus twee reconstructies van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging ([KNMI, 2021](#)); Rechts: Zeespiegel aan de Nederlandse kust zoals waargenomen en volgens de nieuwe, indicatieve zeespiegelprojecties. De getrokken lijnen in groen, rood geven de mediaan aan van die projecties, het gekleurde gebied de 90%-bandbreedte ([KNMI, 2021](#)). SSP staat voor Shared Socioeconomic Pathway en beschrijft verschillende emissiescenario's (gelieerd aan de onderliggende socio-economische ontwikkelingen) waarbij de wereldwijde temperatuurstijging tegen het einde van de 21^{ste} eeuw beperkt blijft tot gemiddeld 1.8, 2.7 en 4.4 graden Celsius boven pre-industriële niveaus voor SSP2.6, SSP4.5 en SSP8.5, respectievelijk. Zie webportal [Dutch Sea Level Change](#).

De toekomstige zeespiegelprojecties voor Nederland zijn berekend voor verschillende scenario's van toekomstige uitstoot van broeikasgassen en bijbehorende klimaatverandering, zie Afbeelding 4 rechts. De zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust varieert afhankelijk van het [emissiescenario](#), terwijl voor het Waddengebied regionale schattingen zijn gedaan ([Vermeersen et al., 2018](#)). Voor het jaar 2150 zou dat voor het hoogste emissiescenario gemiddeld 2 meter betekenen. Tot het jaar 2300 zijn ook zeespiegelscenario's berekend voor de Nederlandse kust aan de hand van deze emissiescenario's, maar door onzekere ijsscap-processen zoals het instorten van ijskliffen aan de rand van Antarctica kunnen die scenario's niet goed geschat worden; het kan dan gaan over vele meters zeespiegelstijging ([KNMI, 2021](#)). De stijging van de zeespiegel zijn overigens veranderd over de tijd, afhankelijk van nieuwe inzichten; zo toont [Garner et al. \(2018\)](#) aan de hand van 70 studies dat vanaf midden 2000 de voorspellingen van zeespiegelstijging zijn toegenomen.

5.2. Gevolgen zeespiegelstijging

Nationaal staan momenteel de effecten van zeespiegelstijging volop in de belangstelling. Er zijn voor Nederland meerdere studies uitgevoerd waarbij gekeken is naar de verschillende toekomstbeelden van Nederland (zie in deze Deltafact Hoofdstuk 9 'Praktijkervaringen en lopende initiatieven' en Hoofdstuk 11 'Bronnen & Links') waarbij breder is gekeken dan naar zoetwaterbeschikbaarheid alleen. Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de Deltacommissaris hebben in 2019 het [Kenniprogramma Zeespiegelstijging](#) opgezet om goed zicht te krijgen op de mogelijke zeespiegelstijging, de gevolgen hiervan voor onder andere de zoetwatervoorziening, en het identificeren van lange termijn oplossingen. De gevolgen van een zeespiegelstijging voor de zoetwatervoorziening en specifiek het beheer van grond- en oppervlaktewater zijn bestudeerd in o.a. recente studies van Deltares ([Delsman et al., 2022](#); [Haasnoot et al., 2018](#)) en de Universiteit Utrecht ([Schra et al., 2022](#)). [Kwadijk et al. \(2010\)](#) toont aan dat bij de lange termijn planning van het Nederlandse waterbeheer onder verschillende klimaatveranderingsscenario's een punt kan worden bereikt waarop de verandering zo ingrijpend is dat de huidige waterbeheerstrategieën niet langer effectief zijn voor het bereiken van hun doelstellingen. De resultaten van dit onderzoek, waarbij de onzekerheid is uitgedrukt in termen van de periode waarin een bestaande strategie effectief blijft, kunnen beleidsmakers inzicht bieden in de mogelijke dreiging van klimaatverandering en zeespiegelstijging voor de zoetwatervoorziening in het westen van Nederland, waarschijnlijk groter dan die veroorzaakt door overstromingen.

5.2.1. Oppervlaktewatersysteem

Het gebied langs de (beneden)rivieren is van groot belang als zoetwaterbron, omdat hier water van het hoofdwatersysteem wordt ingelaten naar regionale wateren ten behoeve van peilbeheer, doorspoelen, beregening, en voor de inname van koel-, proces- en drinkwater. Zoutconcentraties hoger dan 150 tot 250 mg Cl/L zijn in veel gebieden een grens waarboven geen water meer ingelaten wordt vanwege zoutgevoelige functies. In de toekomst zullen verschillende aspecten de zoetwaterbeschikbaarheid in het kustgebied beïnvloeden. Denk daarbij niet alleen aan zeespiegelstijging (als onderdeel van klimaatverandering), maar ook drogere zomers en langere droogteperioden zoals in 2018-2019 ([Brakkee et al., 2022](#)) en zomerse hoosbuien ([KNMI, 2021](#)), veranderingen in watervraag en -aanbod en verandering in landgebruik. Onzekerheden rond de zoetwateropgaven in Nederland worden vooral beïnvloed door de ontwikkelingen in watervraag en waterbeschikbaarheid vanuit rivieren en neerslag.

De stijging van de zeespiegel en veranderingen in rivierafvoer hebben gevolgen voor de zoetwatervoorziening in het westen en noorden van Nederland. Ten eerste is langs de rivieren landinwaarts over grote afstanden opzet van de typische waterstanden te verwachten, als doorwerking van zeespiegelstijging. De effecten zijn daar tweeledig ([Schra et al., 2022](#)) (Afbeelding 3): in bovenstroomse richting is er naast opstuwing van rivierwater ook een effect door het dieper landwaarts doordringen van getij. In benedenstroomse richting kan er herverdeling van het rivierdebiet over de Rijntakken optreden. Deze optellende directe effecten van zeespiegelstijging vergroten de kans op ongewenst overstromen in alle deelgebieden in laag Nederland; waar overstroming met brak water gebeurt, zal dat bovendien verzilting versterken.

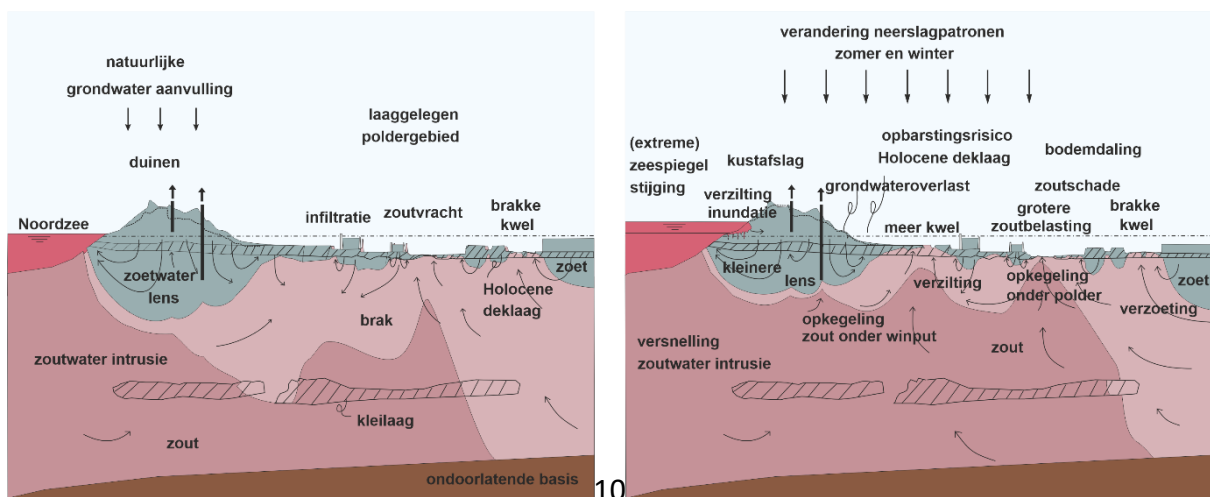
Een belangrijk effect van zeespiegelstijging en klimaatverandering is een verandering in de verdeling tussen zoet en zout oppervlaktewater in het laaggelegen kustgebied. Het open estuarium laat zeewater het land binnendringen en dit wordt tegengehouden door het zoete water van de rivieren ([Schra et al., 2022](#)). Bij hoge zeewaterstanden en lage rivierafvoeren komt het zoute water echter verder landinwaarts. Bij lage zeewaterstanden en hoge rivierafvoeren stroomt juist relatief veel zoetwater de Noordzee in. Door de afwisseling van hoge en lage zeewaterstanden en rivierafvoeren varieert het zoutgehalte in het benedenrivierengebied sterk in de tijd, waarbij getijden een rol spelen. De afwisseling van hoge en lage rivierafvoeren speelt op de tijdschaal van seizoenen, maar bij hoogwaters ook soms op die van weken.

Op de lange termijn zijn veranderingen in de gemiddelde zeewaterstand en in de duur, frequentie en intensiteit van (zeer) lage rivierafvoeren van belang. Verzilting van oppervlaktewater door stijgende zeespiegel speelt tot 2050 waarschijnlijk een ondergeschikte rol, maar kan vanaf 2050 wel een significante toename van zoutindringing via de rivieren opleveren, wat kan leiden tot het vaker en langer moeten sluiten van inlaatpunten in het benedenrivierengebied (zoals Bernisse (met gevolgen voor het Brielse Meer), Lek en Gouda). Modelberekeningen en 50 jaar afvoer- en getijdenmetingen laten zien ([Van den Brink et al., 2019](#)) dat door de combinatie van zeespiegelstijging (KNMI'14 WH scenario, jaar 2085 ([KNMI, 2015](#))) en afnemende rivierafvoeren de inlaatpunten langs de Lek (o.a. Bergambacht en Kinderdijk) steeds kwetsbaarder worden voor zoutindringing, voor zowel de jaarlijkse

gemiddelde chlorideconcentratie als langdurige overschrijdingen van de drempelwaarde van 150 mg Cl/L. Modelberekeningen tonen aan dat het omleiden van een hogere zoetwaterafvoer naar de Lek van enkele tientallen m³/s het risico op verzilting bij de inlaatpunten stroomopwaarts vermindert, maar volledige compensatie niet mogelijk is. Het is mogelijk dat de klimaatbestendige wateraanvoer (KWA) voor inlaatpunt Gouda, die nu in principe alleen bij extreme droogte wordt ingezet, permanent noodzakelijk wordt bij een stijgende zeespiegel. Bij een meer extreme projectie kan dit zelfs al rond 2070 nodig zijn. Verzilting van het hoofdwatersysteem in het noordelijk deltabekken vormt een risico voor de zoetwatervoorziening in Midden-West Nederland. Eerdere berekeningen laten zien dat de KNMI'06 klimaatscenario's zullen leiden tot een toename van de verzilting in het benedenrivierengebied (Beijk, 2008).

5.2.2. Grondwatersysteem

Onderzoek naar het effect van zeespiegelstijging op grondwatersystemen is uitgevoerd in verschillende regio's in Nederland, vaak in combinatie met bodemdaling en veranderende neerslagpatronen. Voorbeelden van deze onderzoeken zijn uitgevoerd voor heel Nederland ([Kwadijk et al., 2007](#); [Oude Essink, 2007](#)), Zuid-Holland ([Oude Essink et al., 2010](#)), Zeeland ([Van Baaren et al., 2016](#)) en delen van het Waddengebied ([Faneca Sánchez et al., 2012](#); [Pauw et al., 2012](#)). Onlangs is voor Spoor II van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging onderzocht wat de effecten zijn van verschillende zeespiegelstijging scenario's (0.5 m, 1 m en 3 m) op de verzilting van het grondwatersysteem en de doorspoelwatervraag in heel Nederland. Dit onderzoek hield rekening met bodemdaling en autonome verziltingsprocessen ([Delsman et al., 2022](#), [Delsman et al., 2023](#)) en maakte gebruik van langjarige modelberekeningen met behulp van het LHM zoet-zout modelinstrumentarium uitgevoerd ([De Lange et al., 2014](#); [Delsman et al., 2020](#)).



Afbeelding 5 Conceptuele schetsen van de effecten van een zeespiegelstijging voor het grondwatersysteem in het Nederlandse kustgebied: a. de huidige situatie en rechts b. de toekomstige situatie. De verzilting van het grondwatersysteem neemt geleidelijk toe: dikke zoetwaterlenzen worden kleiner en dunne regenwaterlenzen kunnen verdwijnen, terwijl meer zout grondwater in laaggelegen poldergebieden omhoog stroomt. Omdat het gemiddelde polderpeil op regionale schaal lager ligt dan het gemiddelde zeeniveau, vindt zowel zoutwaterinrusie vanuit de zee plaats als opwaartse grondwaterstroming van brak tot zout grondwater (vrij naar: [Oude Essink, 2007](#)).

Afbeelding 5 illustreert de mogelijke reactie van het grondwatersysteem in het Nederlandse kustgebied op een (extreme) zeespiegelstijging.

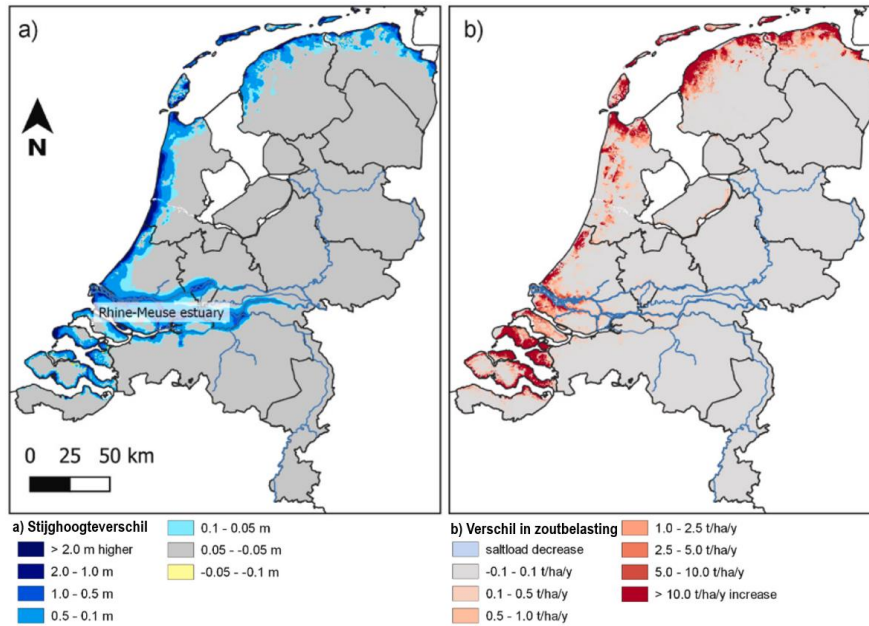
Uit de studies blijkt het volgende:

- de invloedssfeer van zeespiegelstijging op de landinwaartse grondwatersituatie strekt zo'n 10 tot 20 km vanaf de kust en vanaf de oevers van meestijgende binnenwateren (Afbeelding 6a). Hydrogeologische kenmerken van de ondergrond (de dikte en de hydraulische doorlatendheid van de watervoerende pakketten, en de hydraulische weerstand van de slecht doorlatende lagen) bepalen hoe ver de stijghoogte in watervoerende pakketten toeneemt door zeespiegelstijging. Mogelijk zou de Holocene deklaag kunnen opbarsten, maar alleen bij een extreme zeespiegelstijging en op een beperkt aantal locaties (bijv. eventueel langs de randen van enkele Zuid-Hollandse eilanden ([Haasnoot et al., 2018](#))).
- binnen de invloedssfeer neemt de kwelflux toe met maximaal 2 mm/dag bij een zeespiegelstijging van 3 meter; deze fluxen zijn overigens niet alarmerend als je ze vergelijkt met neerslag gebeurtenissen die bepalend zullen blijven voor de pompcapaciteit van de gemalen. De toename in flux neemt exponentieel af met toenemende afstand van de kust. Op sommige locaties zal de neerwaartse infiltratie kunnen omslaan naar opwaartse nutriëntrijke kwel met bijbehorende grondwaterkwaliteitsproblemen.
- de toename van de kwelflux door een zeespiegelstijging zorgt ook voor een toename van de zoutvracht naar het oppervlaktewater (Afbeelding 6b). Afbeelding 7a (gestippeld gebied) toont aan de hand van modelberekeningen de (mogelijke) locaties van een toename van verziltingsproblemen in het jaar 2100; deels komt dit door het trage autonome grondwater verziltingsproces in de Nederlandse ondergrond en deels door een zeespiegelstijging. Bovendien komt over een langere tijdschaal dieper en zouter grondwater uit de ondergrond omhoog, waardoor de zoutvracht op termijn extra zal toenemen. Door dit versterkende proces is een versnelling zichtbaar in de zoutvracht ten opzichte van de zeespiegelstijging (Afbeelding 7b). De toename van zoutvracht wordt voor de meeste gebieden gaandeweg voornamelijk bepaald door zeespiegelstijging;

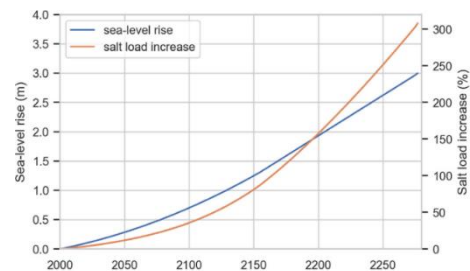
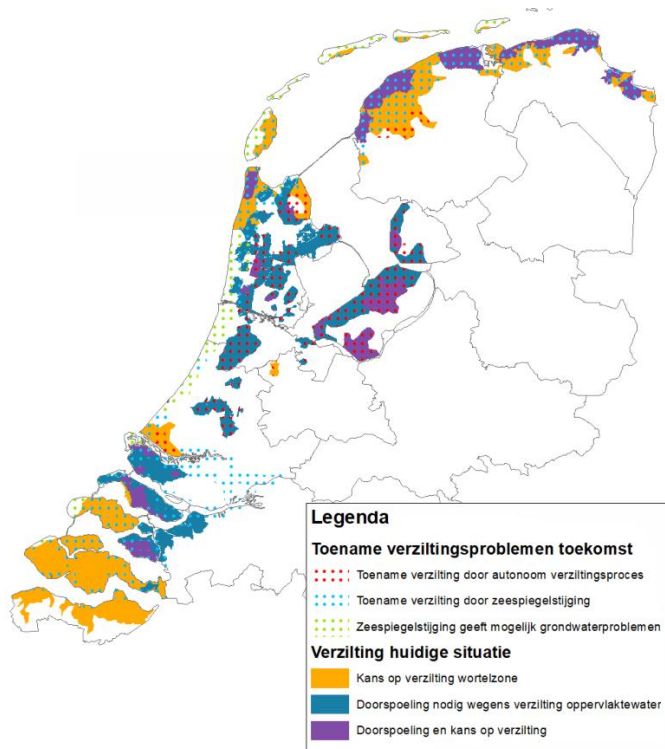
autonome processen en bodemdaling hebben bij 3 meter zeespiegelstijging een kleiner effect op de zoutvracht. Bij 0.5 meter zeespiegelstijging is de relatieve bijdrage van bodemdaling en autonome processen nog van eenzelfde orde van grootte als de bijdrage van zeespiegelstijging.

- als wordt aangenomen dat de huidige streefwaarden voor chlorideconcentraties in het regionale oppervlaktewater gehandhaafd blijven, dan zal de toegenomen zoutvracht, ook in nieuwe kwelgebieden, leiden tot een aanzienlijke toename in doorspoelwatervraag van zoetwater. De zoetwatervraag in poldergebieden neemt bij huidige landgebruik dan toe van totaal 20 m³/s, tot ongeveer 50, 90 en 270 m³/s voor respectievelijke zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m zeespiegelstijging ([Delsman et al., 2022](#), [Delsman et al., 2023](#)). Deze toenames zullen de uitvoerbaarheid van de Voorkeursstrategie Zoetwater negatief beïnvloeden. Het moet worden opgemerkt dat de berekeningen van de toename van de doorspoelwatervraag voor enkele kust nabije gebieden onzeker zijn. Deze onzekerheid staat los van andere ontwikkelingen, zoals veranderingen in de watervraag tegen het einde van de eeuw als gevolg van toekomstig landgebruik of dat bij sterke zeespiegelstijging verzilting in bepaalde poldergebieden wordt geaccepteerd als onderdeel van het principe Water en Bodem Sturend.

Zonder zeespiegelstijging zal in de toekomst overigens ook sprake zijn van verzilting via het grondwater en afname van de zoetwaterbeschikbaarheid als gevolg van natuurlijke processen en antropogene activiteiten die al vele eeuwen gaande zijn. Inpoldering, bodemdaling en grondwateronttrekkingen zorgen dat brak en zout grondwater uit de diepe ondergrond met de tijd langzaam omhoog blijft stromen ongeacht de zeespiegelstijging.



Afbeelding 6 a. De invloedssfeer van een zeespiegelstijging in het grondwatersysteem. Modelberekeningen laten bij een scenario van 3m zeespiegelstijging (jaar 2277) het stijghoogte verschil (in m) zien in de eerste watervoerende laag ten opzichte van het scenario zonder zeespiegelstijging, b. verschil in zoutbelasting (in ton Cl⁻/ha/j) bij een 3m zeespiegelstijging (jaar 2277). De zoutbelasting wordt gedefinieerd als de opwaartse stroming van chloride van de eerste watervoerende laag naar de bovenste opsluitende eenheid (Delsman et al., 2022, Delsman et al., 2023).



Afbeelding 7 a. De verziltingsrisicokaart geeft aan de hand van modelberekeningen een landelijk beeld van het risico op verzilting, bij 1 meter zeespiegelstijging in het jaar 2100 (Delsman, 2021). De kaart is met name gericht op landbouw en waterbeheer; diepere verziltingsproblemen verder landinwaarts maken geen deel uit van deze kaart, zoals bijvoorbeeld het verzilten van diepe winputten. b. in het kustgebied zal de toename van de zoutbelasting door zeespiegelstijging (t.o.v. de huidige situatie, in %) plaatsvinden (Delsman et al., 2022). De grootste verandering in zoetwatervraag vindt plaats met name de polders van Noord-Holland, Friesland en Groningen.

De diepe grote zoetwaterlenzen van Zuid- en Noord-Holland (die worden beheerd door Dunea, Waternet, en PWN) zijn belangrijk voor de drinkwatervoorziening. Deze voorraden kunnen waarschijnlijk met aangepast beheer (zoals bijvoorbeeld extra aanvulling, optimalisatie onttrekkingen in combinatie met slimmere monitoringstechnieken en eventueel brak grondwaterwinning en ontzilting) de komende 100 jaar een zeespiegelstijging aan, zolang het duinmassief maar groot en hoog genoeg is om grondwaterstandsopbolling toe te staan ([Haasnoot et al., 2018](#)). Bij verdere zeespiegelstijging laten modelberekeningen zien dat deze volumes over de tijd afnemen, tot een afname van maximaal 10%. Op langere termijn lijkt het waarschijnlijk dat bij hogere zeespiegelstanden (2 – 3 meter) alle middelgrote zoetwaterlenzen (tot ongeveer 60-80 m dik) zullen verdwijnen. Dit zijn de zoetwaterlenzen met een beperkte dikte op enkele Waddeneilanden, in Friesland en Groningen, in de Kop van Noord-Holland, in de omgeving van Hoek van Holland en Katwijk die niet voor de drinkwatervoorziening worden ingezet. De dunne regenwaterlenzen in de kreekrugsystemen in de Zuidwestelijke Delta ondergaan zonder maatregelen zoals ondergrondse waterberging op termijn vermoedelijk bij grote zeespiegelstijging hetzelfde lot. De grotere zoetwaterlenzen zullen dan waarschijnlijk zodanig krimpen dat ze mogelijk niet meer functioneel kunnen worden ingezet voor de drinkwatervoorziening.

5.2.3. Effecten in kustgebieden wereldwijd

Hoewel deze Deltafact zich richt op het Nederlandse water systeem, wordt wereldwijd onderzoek gedaan naar de impact van een klimaatverandering en zeespiegelstijging op het watersysteem in kustgebieden. Deze studies richten zich op de beschikbaarheid van zoetwater ([Green et al., 2011](#); [Taylor et al., 2013](#)) al dan niet beïnvloed door menselijk handelen zoals grondwateronttrekkingen ([Wada et al., 2010](#); [Wada et al., 2014](#)). Voor grondwater zijn meerdere onderzoeken uitgevoerd, zoals conceptuele en numerieke analyses voor de mondiale schaal ([Ferguson en Gleeson, 2012](#); [Michael et al., 2013](#); [Werner en Simmons, 2009](#)), reviews (bijv. [Ketabchi et al., 2016](#)), en verschillende modelstudies op landniveau (zoals in de Verenigde Staten: [Befus et al., 2020](#); Egypte: [Mabrouk et al., 2018](#); Denemarken: [Rasmussen et al., 2013](#); België: [Vandenbohede et al., 2008](#); Bangladesh: [Yu et al., 2010](#)). Voor bepaalde delta's is onderzocht hoe de verzilting in het oppervlaktewatersysteem toeneemt als gevolg van een zeespiegelstijging, waarbij de zoutconcentratie landinwaartse steeds verder toeneemt zoals bijv. voor Bangladesh

tot op 80 km van de kustlijn ([Bhuiyan en Dutta, 2012](#)) en voor de Mekong tot 50-60 km van de kustlijn ([Vu et al., 2018](#)). Dit kan leiden tot een verminderende landbouwproductie en verlies aan landbouwgrond (bijv. tienduizenden ha rijstteelt in de Mekong delta ([Thuy en Anh, 2015](#))). In laaggelegen kustgebieden en eilanden zonder adequate bescherming kan zeewater bij zware stormen, tsunami's en cyclonen verder landinwaarts binnendringen en het grondwatersysteem verziltten (bijv. [Cantelon et al., 2023](#)). Met name de eilandstaten (Small Island Developing States), met ongeveer 63 miljoen mensen ([Weigelt et al., 2013](#)), hebben te kampen met een tekort aan zoet oppervlaktewater omdat aanvoer van zoetwater vanuit externe bronnen niet mogelijk is. Ze zijn afhankelijk van regenwater en grondwater voor drinkwater en de kleinschalige landbouw. Tegelijk worden de bestaande zoete grondwatervoorraden uitgeput door overexploitatie, bedreigd door kusterosie ([Dixon-Jain et al., 2014](#)) of raken ze verzilt door overstromingen, wat een ernstige bedreiging vormt voor de zoetwatervoorziening op deze eilandstaten ([Storlazzi et al., 2018](#)). De kwetsbare zoetwatervoorziening is voor deze staateilanden van vitaal belang; bovendien zijn ze uiterst kwetsbaar voor zeespiegelstijging omdat ze vaak niet meer dan een paar meter boven zeeniveau liggen.

6. Kosten en baten

Tot nu toe zijn voor zover bekend geen integrale studies uitgevoerd die specifiek kijken naar de (maatschappelijke) kosten en baten van de effecten van zeespiegelstijging op het zoete grond- en oppervlaktewatersysteem in Nederland. Er is wel onderzoek gedaan naar verschillende onderdelen zoals de kosten van zoutschade aan gewassen of de impact van zeespiegelstijging op de doorspoelbehoefte, maar er ontbreekt een integrale benadering met alle componenten waarbij de effecten van een zeespiegelstijging centraal staan.

In de studie 'Economische analyse Zoetwater' ([Stratelligence, 2021](#)) is onderzoek gedaan naar het netto-economisch effect van een pakket zoetwatermaatregelen, met de nadruk op (extreme) droogte en laagwater, maar er is geen specifieke analyse uitgevoerd naar de effecten van zeespiegelstijging. Voor waterveiligheid is in internationaal verband onderzocht welke mogelijke (maatschappelijke) kosten (overstromingsrisico, schade) kunnen ontstaan, maar dit valt buiten de scope van deze Deltafact ([Hinkel et al., 2014](#); [Jonkman et al., 2013](#); [Pycroft et al., 2016](#); [Tiggeloven et al., 2020](#)).

In de studies van SWECO ([2021a](#), [2021b](#)) is geanalyseerd welke investeringsopgaven nodig zijn in de Deltaprogramma-regio's, rekening houdend met de verwachte zeespiegelstijging. Als richtlijn is een investeringssom geschat van ongeveer 900 miljard tot 2050, voor de zes grote opgaven in Nederland (woningbouw, infrastructuur, energietransitie, klimaatadaptatie, landbouw en natuur). Hierbij zijn geen kosten opgevoerd van landbouwinvesteringen op bedrijfsniveau. De opgaven vraagt om een ruimtegebruik van meer dan 100000 ha en zal de inrichting van ons land bepalen, ook na 2050. Bij deze investeringen is echter nauwelijks rekening gehouden met de toekomstige gevolgen van een stijgende zeespiegel en de bijbehorende kosten om bijvoorbeeld hogere waterstanden op en langs de kust en rivieren, verzilting, verdroging en vernatting van laaggelegen gebieden tegen te gaan. De investeringen die nu worden gedaan voor de opgaven waar Nederland voor staat, hebben een levensduur van tientallen jaren en zullen onderdeel moeten worden van nieuwe infrastructurele netwerken die nog veel langer meegaan. De stijgende zeespiegel kan er echter toe leiden dat deze investeringen in de toekomst alsnog moeten worden aangepast of vervangen. Dit geldt vooral voor duinen, dijken en kunstwerken zoals sluizen en keringen, die eerder dan gepland versterkt en verhoogd moeten worden.

Zonder gecoördineerd beheer bestaat het risico dat in de toekomst onvoldoende flexibiliteit of ruimte beschikbaar is (lock-in's) om de noodzakelijke aanpassingen te maken om ons land veilig en leefbaar te houden ([SWECO, 2021a](#)).

Het lijkt waarschijnlijk dat 'zeespiegelstijgingsbestendig' beheer van zoet grond- en oppervlaktewater voordelen oplevert voor verschillende (andere) functies, zoals natuurterreinbeheer, drinkwatervoorziening in duingebieden, voedselproductie en mogelijk zelfs voor woningbouw en infrastructuur, door het verminderen van toekomstige onderhoudskosten.

7. Randvoorwaarden

Voor Nederland is het van belang dat de deltabeslissingen die voortkomen uit de voorkeurstrategieën ([Nationaal Deltaprogramma Zoetwater, 2021](#)) hand in hand gaan met andere transitieën. Deze transitieën omvatten onder meer energie, water(kwaliteit), verduurzaming van de landbouw en woningbouw en vereisen allemaal aanpassingen in de ruimtelijke inrichting (zie bijv. [Kuiper Compagnons, 2021](#)). Een versnelde zeespiegelstijging voegt bovendien externe complicaties toe en legt een extra druk op het grond- en oppervlaktewatersysteem. Daarom moeten

adaptatiestrategieën ook rekening houden met dit aspect. Het is essentieel dat er afstemming is tussen al deze transities ([Hamers et al., 2021](#)).

De studie '[Op Waterbasis](#)' en de Kamerbrief '[Water en Bodem Sturend](#)' geven al aan dat de grenzen van het bodem- en watersysteem in beeld komen. Op kaarten is aangegeven welke gebieden te slap, te nat, te droog, te zout, of overstroombaar zijn ([Deltares et al., 2021](#)). Met deze kaarten wordt geprobeerd bij te dragen aan het agenderen van de transitieopgave op het gebied van ruimtelijke ordening waar we deze eeuw voor staan. Daarnaast wordt hiermee aangetoond welke kennis over bodem en water van belang is voor een ruimtelijke ordening waarbij water en bodem als leidende factoren dienen.

8. Governance

De overheid heeft een belangrijke rol om de randvoorwaarden te scheppen waarbij bedrijven, kennisinstellingen en maatschappelijke organisaties (incl. burgers en lokale gemeenschappen) met hen samen werken om de risico's van zeespiegelstijging te beoordelen en passende maatregelen te nemen om deze risico's te beheersen. De overheid moet daarbij zorgen voor de juiste wet- en regelgeving, financieringsmechanismen, monitoring van maatregelen en evaluatie van voortgang om ervoor te zorgen dat de gewenste doelstellingen worden bereikt. Governance processen, waaronder de juiste wet- en regelgeving, financieringsmechanismen, monitoring van maatregelen en evaluatie van voortgang, spelen een cruciale rol bij de besluitvorming en uitvoering van maatregelen om Nederland klimaatbestendig te maken onder extreme zeespiegelstijging.

De studie van [Termeer et al. \(2016\)](#) laat in opdracht van het Planbureau voor de Leefomgeving in een historische analyse zien dat door de tijd heen zoetwatervoorziening in het waterbeleid (naast waterkwaliteit en waterveiligheid) onduidelijk is gedefinieerd, dat zoetwater een beperkte aandacht kreeg en dan in de vorm van een reeks deelproblemen (zoals drinkwater, irrigatie, verzilting, lage rivierstanden). Vanaf 2008 is Zoetwater terug op de agenda gezet door de Deltacommissie. In het Deltaprogramma Zoetwater is gekeken naar de veranderingen naar handelingsperspectieven voor de versterking van governance strategieën in het zoetwatervoorzieningsbeleid, ook ten aanzien van klimaatadaptatie en te anticiperen op ontwikkelingen in de verdere toekomst. Binnen het [Kennisprogramma Zeespiegelstijging](#) is bijvoorbeeld in Spoor V

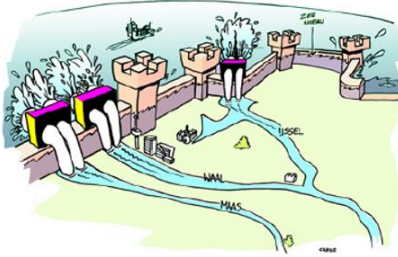
([Implementatievraagstukken](#)) gekeken hoe Nederland in de toekomst kan omgaan met zeespiegelstijging. [Swinkels en Raadgever \(2022\)](#) hebben onderzocht in hoeverre lokale bestuurders en beleidsmedewerkers bij locatiekeuzes voor woningbouw/gebiedsontwikkeling en ontwerpkeuzes op het niveau van gemeente en regionale overheden rekening houden met de gevolgen van zeespiegelstijging. Drie pilotgebieden in de regio's Zwolle, Noord-Holland en Zeeland zijn geanalyseerd. Hoewel er een gevoel is van urgentie en eigenaarschap, maakt de onzekerheid over de omvang van regionale effecten het moeilijk om concrete maatregelen te nemen en hierover te communiceren met individuele belanghebbenden zoals (agrarische) bedrijven en bewoners.

9. Praktijkervaringen en lopende initiatieven

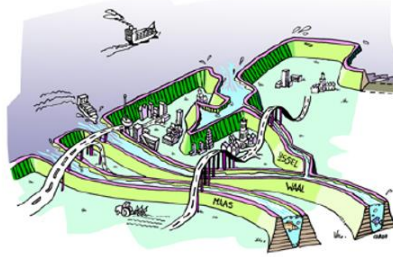
In het [Kennisprogramma Zeespiegelstijging](#) onderzoeken overheden, bedrijven, kennisinstellingen en maatschappelijke organisaties de mogelijke gevolgen van de zeespiegelstijging zijn voor ons land. Het toonaangevende programma heeft een duidelijke relatie met het Deltaprogramma, dat bestaat uit drie deelprogramma's (Waterveiligheid, Zoetwater en Ruimtelijke Adaptatie). Deze programma's omvatten strategieën om Nederland aan te passen aan de gevolgen van zeespiegelstijging, en worden regionaal toegepast in zeven verschillende regio's (IJsselmeergebied, Rijnmond-Drechtsteden, Rivieren Rijn en Maas, Zuidwestelijke Delta, Kust, Waddengebied en Hoge Zandgronden). In het Kennisprogramma worden de verschillende scenario's met betrekking tot de snelheid en omvang van de zeespiegelstijging en de mogelijke gevolgen voor Nederland verkend langs een viertal denkrichtingen (bijv. Afbeelding 8). In het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, dat loopt van 2019 tot en met 2025, richt zich op vragen zoals:

- [welke mate van zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust kunnen we verwachten?](#)
- [hoeveel zeespiegelstijging kunnen we aan met de huidige strategieën en maatregelen?](#)
- [wat zijn mogelijke oplossingen voor zeespiegelstijging in de verre toekomst?](#)
- [wat is er nodig op het gebied van communicatie, participatie en organisatie?](#)

Beschermen gesloten
Dammen, dijken, sediment, wetlands, vooroevers



Beschermen open
Stormvloedkeringen, dijken, sediment, wetlands, vooroevers



Zeewaarts
Eilanden met / zonder keringen, zeewaartse polders



Meebewegen
Opgehoogde / drijvende gebouwen, landspiegelsstijging, migratie



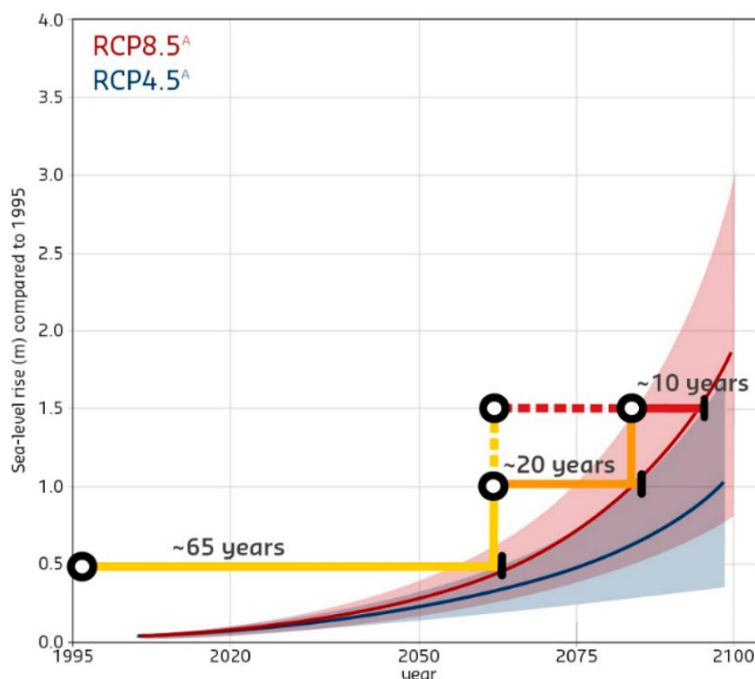
Afbeelding 8 Conceptuele 'denkrichtingen' voor adaptatie aan hoge zeespiegelstijging voor de Nederlandse delta, elk met eigen uitdagingen, voor- en nadelen en kostenposten (bron: [Haasnoot et al., 2018](#), [Haasnoot et al., 2019](#)).

De uitvoering van het programma loopt over een vijftal sporen:

1. Spoor I Zeespiegelstijging en Antarctica: Wat kunnen we verwachten zodat betrouwbaardere toekomstvoorspellingen gemaakt kunnen worden, en wat zijn de gevolgen hiervan voor de zeespiegelstijging in Nederland?
2. Spoor II Systemverkenningen: Tot hoeveel stijging volstaan de voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma, en zijn aanpassingen mogelijk om ze langer vol te houden zodat Nederland ook bij een meer extreme zeespiegelstijging het kustfundament, de waterkeringen en zoetwatervoorziening op orde kan houden terwijl rekening wordt gehouden met de gevolgen voor andere sectoren zoals havens, scheepvaart, wonen, recreatie, landbouw en natuur.
3. Spoor III Signaleringsmethodiek: Hoe optimaliseren we de methodiek Meten-Weten-Handelen om signalen op te pikken en tijdig de nodige maatregelen te kunnen nemen?
4. Spoor IV Lange termijn opties: Wat is het handelingsperspectief, voor met name ná 2100: welke lange termijn oplossingsrichtingen zijn er voor als de huidige strategie niet meer houdbaar is? En hoe kunnen we daar nu al rekening mee houden?

5. Spoor V Implementatiestrategie: Wat is er nodig om alle relevante partijen te betrekken bij het kennisprogramma en hoe kun je een eventuele verandering naar een andere aanpak voor elkaar krijgen?

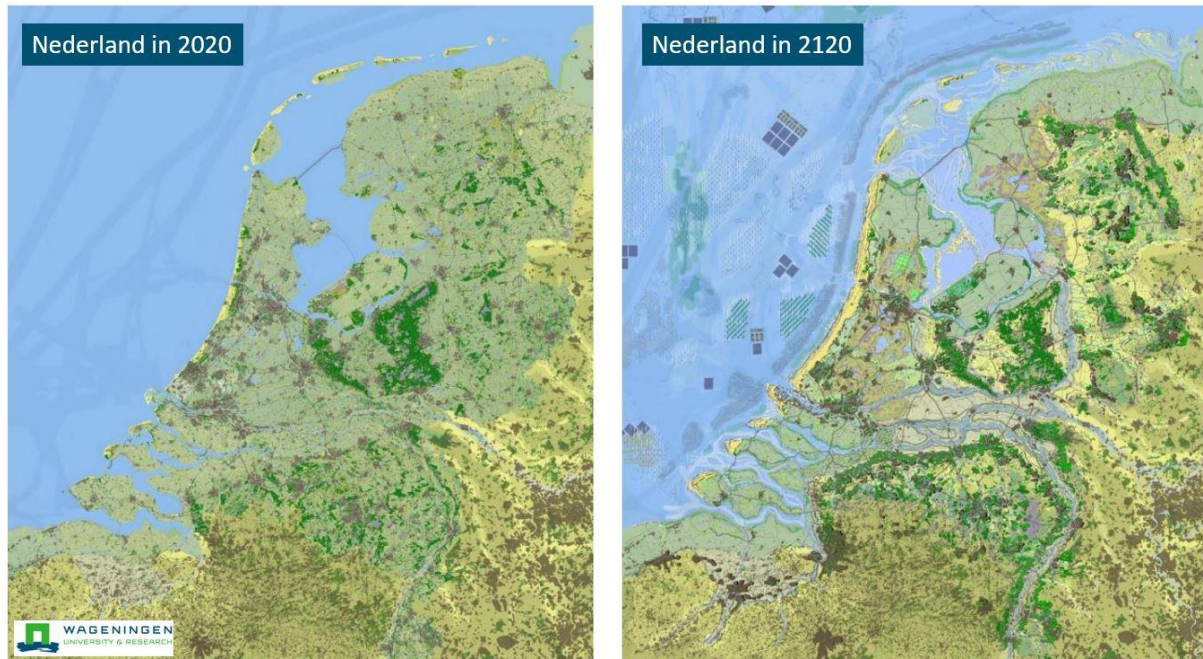
Voorafgaand heeft Deltares een eerste inventarisatie uitgevoerd naar de mogelijke gevolgen van een extra versnelde zeespiegelstijging voor het kustfundament (inclusief de Wadden en Zuidwestelijke delta), de waterveiligheid, en de zoetwatervoorziening in Nederland ([Haasnoot et al., 2018](#); [Haasnoot et al., 2020](#)). Er kan geconcludeerd worden dat het Deltaprogramma nog niet hoeft over te stappen op een andere strategie vanwege de nog niet urgente extra versnelde zeespiegelstijging. Er moet wel tijdig onderzoek worden gedaan naar de mogelijke gevolgen en alternatieven, waarbij het aanpassen van strategieën moet worden beschouwd als een essentieel onderdeel van adaptief deltamanagement. Het is raadzaam om bij de (extra) versnelde zeespiegelstijging voor de periode na 2100 rekening te houden. Het tijdspecter is bij een extra versnelde zeespiegelstijging dan wel cruciaal; als deze versnelling vanaf 2050 merkbaar is, dan zullen aanpassingen sneller en op kortere termijn moeten gebeuren, omdat de functionele levensduur van adaptatiemaatregelen snel afneemt bij versnelde zeespiegelstijgingen ([Haasnoot et al., 2019](#)), zie Afbeelding 9.



Afbeelding 9 Het effect van versnelde zeespiegelstijging op de levensduur van investeringen. In de huidige situatie houdt een ontwerp voor 50 cm 65 jaar aan. De mogelijke versnelling later deze eeuw verkort de levensduur van een ontwerp van 50 cm tot ongeveer 10 jaar ([Haasnoot et al., 2020](#); [Van Alphen et al., 2022](#)).

In een vervolgstudie zijn mogelijke adaptatiepaden van oplossingsrichtingen onderzocht die nodig zijn om Nederland aan te passen aan de stijgende zeespiegel (Spoor IV), zoals het identificeren van verschillende bouwstenen voor fysieke maatregelen om de waterveiligheid te waarborgen ([Haasnoot and Diermanse, 2022](#)). De studie richt zich vooral op waterveiligheid, dijkversterking, afvoer van rivierwater, sedimentmaatregelen en veranderingen in het overstromingsrisico, maar de bouwstenen kunnen worden aangevuld met maatregelen die gericht zijn op het voorkomen van of aanpassen aan toenemende verzilting of maatregelen ter vergroting van de zoetwaterbeschikbaarheid. In 2023 zijn diverse deelrapporten verschenen die onderzoeken hoe goed de huidige strategieën en maatregelen de stijgende zeespiegel aankunnen; in vier systeemanalyses is voor de regio's [Volkerak-Zoommeer](#), [Rijn-Maasmonding](#), [IJsselmeer - Markermeer](#) en [Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal](#) is doorgerekend wat de gevolgen zijn van zeespiegelstijging voor o.a. zoetwater. En er is een rapporten opgeleverd over de gevolgen van verzilting van het grondwatersysteem onder verschillende zeespiegelstijging scenario's ([Delsman et al., 2022](#)). De komende jaren zal het Kennisprogramma nieuwe inzichten opbouwen, voortbouwend op bestaande kennis zoals [KNMI Klimaatsignaal'21](#) en het [IPCC 6th Assessment Report](#), en op nieuwe kennis die binnenkort beschikbaar zal komen zoals de [nieuwe KNMI'23-klimaatscenario's \(vanaf Oktober 2023\)](#) en de [geactualiseerde Deltascenario's 2023](#). De bevindingen van alle vijf sporen worden geïntegreerd in een eindrapport dat zal dienen als basis voor de herziening van het Deltaprogramma in 2027.

In een ruimtelijke studie van Wageningen UR zijn toekomstbeelden onderzocht voor verschillende regio's in Nederland in 2120, rekening houdend met een zeespiegelstijging, extremer weer en socio-economische omstandigheden, maar waarin natuur, duurzame economie, leefbaarheid en veiligheid leidend zijn aan de hand van een vijftal principes ([Baptist et al., 2019](#)), zie Afbeelding 10.



Afbeelding 10 Het toekomstbeeld van Nederland in 2120 ([Baptist et al., 2019](#)).

Enkele (wetenschappelijke) programma's en projecten die het thema 'Effecten zeespiegelstijging voor het beheer van zoet grond- en oppervlaktewater' (indirect) behandelen zijn:

- [SALTISolutions](#): in dit NWO programma wordt samen met o.a. Rijkswaterstaat, waterschappen, havenbedrijven en baggeraars een virtueel model (digital twin) van de Rijnmaasdelta gecreëerd om daarmee verziltingsprocessen in het oppervlaktewater op verschillende ruimte- en tijdschalen te testen en te integreren. Hiermee wil men het inzicht vergroten in hoe, waar, wanneer en hoe lang zout uit zeewater zal indringen, en hoe maatregelen zoals het implementeren van nature-based solutions de zoetwatervoorziening beïnvloeden, ook onder een zeespiegelstijging.
- [AGRICOAST](#) (o.a. TU-Delft, Wageningen Universiteit, bedrijven en maatschappelijke organisaties), gefinancierd door NWO vanuit het programma 'Klimaatrobuuste productiesystemen en waterbeheer', kijkt naar het vergroten van de zoetwaterbeschikbaarheid in het Nederlands kustgebied
- [Delta Wealth](#) (o.a. HZ University of Applied Sciences, TU-Delft, NIOZ, Wageningen Universiteit, UU, bedrijven en maatschappelijke organisaties), gefinancierd door NWO vanuit het programma 'Klimaatrobuuste watersystemen op landschapsschaal', kijkt naar de ontwikkeling van aanpassingsroutes naar een klimaatbestendige en welvarende Zuidwestelijke delta onder een versnellende zeespiegelstijging.

- [Toekomstschets](#) van de Universiteit Utrecht wat de natuurlijke reactie van onze delta zou zijn als we de huidige situatie met menselijke invloed als uitgangspunt nemen en geen extra maatregelen treffen: Wat doet het Nederlandse laagland bij twee en vijf meter zeespiegelstijging ([Schra et al., 2022](#)).
- In [Strategische Verkenningen van Rijkswaterstaat](#) en [ReThink the Delta](#) is met het bedrijfsleven, kennisinstellingen en publieke partners gewerkt aan het vraagstuk hoe Nederland en de rest van de wereld leefbaar kan blijven bij twee tot drie meter zeespiegelstijging, onder extreme droogte, neerslag, verzilting en bodemdaling. Het project streeft ernaar om kennis en innovatie te bevorderen op het gebied van kritieke infrastructuur, waterbeheer en adaptief bouwen en om als eerste land ter wereld invulling te geven aan de waterbouwkundige en ruimtelijke opgave van de toekomst.
- De studie 'The Geography of Future Water Challenges - Bending the Trend' ([Ligtvoet et al., 2018](#); [Ligtvoet et al., 2023](#)) toont dat er op globale schaal manieren zijn om water gerelateerde risico's te verminderen in de verschillende 'hotspot landschappen', zoals rivierbekkens, delta's en kustgebieden, droge gebieden en steden. Veel kan worden bereikt door het verminderen van het waterverbruik en waterverontreiniging. Het laat zien dat een fundamentele verandering in het denken over de waarde van water vereist is, binnen de context van menselijke en klimaat veranderingen.
- Het International Panel on Deltas and Coastal Areas ([IPDC](#)) is een initiatief met als doel om delta's, kustgebieden en eilanden te ondersteunen bij hun inspanningen om zich aan te passen aan de impact van klimaatverandering en om de veerkracht van hun waardevolle ecosystemen, levensonderhoud en economische activa te versterken, te midden van andere sociale uitdagingen zoals voedselzekerheid, verlies van biodiversiteit en energievoorziening. De deltaplannen die zijn opgesteld voor de Mekong ([Vietnam-Netherlands, 2013](#)) en de Ganges-Brahmaputra-Meghna, Bangladesh ([General Economics Division \(GED\), 2018](#)) hebben tot doel bij te dragen aan duurzame en klimaatbestendige delta's voor de lange termijn, waarbij zeespiegelstijging een belangrijke factor is. Het ontwikkelen van een strategie om deze veranderingen tegen te gaan en erop in te spelen is cruciaal voor toekomstige generaties in de Mekong en Bangladesh, en elders.
- In de afgelopen jaren (2021/2022) heeft het [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\) de Sixth Assessment Reports](#) uitgegeven over de laatste stand van de wetenschap met betrekking tot klimaatverandering. Werkgroep II richt

zich op de effecten van klimaatverandering op de natuur en de menselijke samenleving, evenals de mogelijkheden om ons aan te passen aan deze veranderingen ([Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022](#)).

Informatieve sites:

- uitleg over de [processen hoe en waarom de zeespiegel stijgt](#) (klimaathelpdesk).
- webportal [Dutch Sea Level Change](#): Visualisatie van de veranderingen in het zeeniveau voor zowel observaties als prognoses (herziening studie [Baart et al., 2018](#)), inclusief informatie over de onderliggende processen die verantwoordelijk zijn voor de veranderingen in het zeeniveau.
- uitleg over de [KNMI-klimaatscenario's](#).
- [verziltende delta's onder menselijke factoren en klimaatverandering](#).

10. Kennisleemtes

In het vorige Hoofdstuk 9 'Praktijkervaringen en lopende initiatieven' is verwezen naar de [systeemanalyses](#) van een viertal regio's waarin recent een aantal kennisvragen zijn beantwoord binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Voor een aantal kennisvragen is de benodigde kennis voor het beheer van het grond- en oppervlaktewater op regionale schaal in Nederland nog niet voldoende uitgewerkt en zodoende 'work-in-progress'. Hieronder is een aantal opgesomd.

Algemene kennisvragen

1. Wanneer moeten we welke beslissingen nemen? Wat is de benodigde tijdslijn voor aanpassingen aan een (extreme) zeespiegelstijging voor sectoren die afhankelijk zijn van water zoals drinkwatervoorziening, agrarische sector, natuur, waterschappen en industrieën?
2. Welke maatregelen lijken het meest geschikt voor welke gebruikers?
 - Hoe lang duurt het om dergelijke maatregelen te implementeren? Dit omvat de tijd voor maatschappelijke urgentie, politieke besluitvorming, ontwikkeling van (nieuwe) technische kennis, procedures en uitvoering. We moeten rekening houden met het feit dat bij een toenemende zeespiegelstijging de beschikbare oplossingsruimte doorgaans kleiner wordt ([Haasnoot et al., 2021](#); [Haasnoot en Diermanse, 2022](#)).
 - Wat zijn de kosten van adaptief zoetwaterbeheer in het licht van een (extreme) zeespiegelstijging, en welke invloed heeft een (extreme)

zeespiegelstijging voor de andere grote uitdagingen, zoals woningbouw, infrastructuur, energietransitie, klimaatadaptatie, landbouw en natuur?

- Wat is de ruimtelijke impact van verschillende strategieën/varianten, rekening houdend met andere uitdagingen (zie bijv. [Kuiper Compagnons, 2021](#), Perspectief NL2121, [Land met een plan](#) - pleidooi voor ruimtelijke ontwikkeling).
- In hoeverre zijn zoetwaterbeschikbaarheid en overstromingsveiligheid gekoppelde processen bij een zeespiegelstijging? Zijn er andere aspecten waarvoor de knippunten in kaart gebracht moeten worden?
- Wat zijn de implicaties van de uitgangspunten van '[Water en Bodem Sturend](#)' voor maatregelen ter waarborging van de (zoet)waterbeschikbaarheid over de (middel)lange termijn bij een zeespiegelstijging?

Kennisvraag over klimaat

- Kunnen we de zeespiegelscenario's voor de (middel)lange termijn nauwkeuriger voorspellen, zelfs rekening houdend onzekere ijskap-processen zoals het instorten van ijskliffen aan de rand van Antarctica?

Kennisvragen over zoetwaterbeschikbaarheid

- Hoe verandert de toekomstige zoetwaterbehoefte in termen van kwantiteit en kwaliteit op specifieke locaties en momenten in de tijd?
 - Hoe beïnvloedt de toekomstige verandering in landgebruik de watervraag?
 - Hoe wordt de watervraag beïnvloed door veranderingen in landgebruik?
 - Hoe verandert het watergebruik in de landbouw, inclusief waterbesparing, efficiëntieverbetering en waterhergebruik in een circulaire landbouw?
 - Hoe beïnvloeden veranderingen in gewasvariëteiten (zout- en droogtebestendigheid) de watervraag?
- Hoe verandert het zoetwateraanbod van onze belangrijkste rivieren in de loop van de tijd?
- Onder welke mate van zeespiegelstijging en gerelateerde sociaal-economische ontwikkelingen treden er kritieke omslagpunten (tipping points) op die van invloed zijn op het vraagstuk van zoetwaterverdeling?
- Wat zijn de (maatschappelijke) kosten en baten van de effecten van een zeespiegelstijging op het zoete grond- en oppervlaktewatersysteem in Nederland?

- Hoe en wanneer moeten sectoren als drinkwatervoorziening, landbouw, waterschappen en industrieën zich aanpassen aan een extreme zeespiegelstijging?
- Zijn de zoetwaterstrategieën te combineren met natuurontwikkeling en verbetering van de waterkwaliteit in de Nederlandse estuaria en rondom de grote zoetwatermeren in Nederland?
- Welke alternatieve zoetwaterstrategieën zijn mogelijk (combinatie van ontzilten, ondergrondse opslag in een water-food-energy nexus, gescheiden wateraanvoer-afvoer) gezien de gevolgen van een zeespiegelstijging? Wat zijn de implementatietijden, kosten, en schaalbaarheid van dergelijke maatregelen?

Kennisvragen, meer gericht op het oppervlaktewatersysteem

- Wat is het effect van een (extreme) zeespiegelstijging op de zoutconcentraties in het rivierengebied?
- Wat zijn de gevolgen van deze veranderingen voor de inlaten zoals Hollandse IJssel/KWA, Lek en Bernisse? Moeten inlaatpunten worden verplaatst, en zijn ze nog even noodzakelijk?
- Blijft de zoetwatervoorraad in het IJsselmeer toereikend als de watervraag verandert, bijvoorbeeld voor het doorspoelen van poldersystemen, het verminderen van zoutindringing in oppervlaktewater, het verhogen van het waterpeil in veenweidegebieden ter compensatie van bodemdaling en het verminderen van CO₂-uitstoot ([Hunink et al., 2021](#))?
- Wat is het effect van een (extreme) zeespiegelstijging (en extreem droge omstandigheden) voor de zoetwaterbeschikbaarheid in de laaggelegen (geïsoleerde) regio's aan de kust op de lange termijn? Wat betekent dit voor de watervraag, rekening houdend met toenemende zoutbelasting en veranderend landgebruik (inclusief natuur)?

Kennisvragen, meer gericht op het grondwatersysteem

- Hoe veranderen de zoetwaterlenzen van verschillende grootte (groot-middel-klein), bijvoorbeeld in duingebieden en kreekruggen,) voor verschillende gebruikers (drinkwater, landbouw, natuur) onder invloed van een zeespiegelstijging, eventuele veranderingen in beheer en samen met maatregelen om het kustfundament te versterken?

- Waar en wanneer bij welke zeespiegelstijging is grondwateroverlast te verwachten bij toekomstige infrastructuur (bijv. belangrijke waterkeringen) en bebouwing (in stedelijk gebied in de kustzone) als gevolg van stijgende kweldruk, hogere grondwaterstanden in de ondergrond en het opbarsten van kleilagen?
- Wat is de verwachte toename van zoute kwel over de Afsluitdijk, rekening houdend met onzekerheden in de hydrogeologie, en wat betekent dit voor de waterkwaliteit in het IJsselmeer in het kader van de zoetwatervoorziening voor de regio?

11. Bronnen & links

Bronnen:

- Baart, F., Rongen, G., Hijma, M., Kooi, H., De Winter, R., Nicolai, R., 2018. [Zeespiegelmonitor 2018](#).
- Baptist, M., Van Hattum, T., Reinhard, S., Van Buuren, M., De Rooij, B., Hu, X., Van Rooij, S., Polman, N., Van den Burg, S., GerJan, P., Ysebaert, T., Walles, B., Veraart, J., Wamelink, W., Bregman, B., Bos, B., Selnes, T., 2019. [Een natuurlijkere toekomst voor Nederland in 2120](#).
- Befus, K.M., Barnard, P.L., Hoover, D.J., Finzi Hart, J.A., Voss, C.I., 2020. [Increasing threat of coastal groundwater hazards from sea-level rise in California](#). Nat. Clim. Chang. 10.
- Beijk, V., 2008. Klimaatverandering en verzilting; Modelstudie naar de effecten van de KNMI '06 klimaatscenario's op de verzilting van het hoofdwatersysteem in het noordelijk deltabekken.
- Bhuiyan, M.J.A.N., Dutta, D., 2012. [Assessing impacts of sea level rise on river salinity in the Gorai river network, Bangladesh](#). Estuar. Coast. Shelf Sci. 96, 219–227.
- Brakkee, E., Van Huijgevoort, M.H.J., Bartholomeus, R.P., 2022. [Improved understanding of regional groundwater drought development through time series modelling: The 2018-2019 drought in the Netherlands](#). Hydrol. Earth Syst. Sci. 26, 551–569.
- 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.
- De Lange, W.J., Prinsen, G.F., Hoogewoud, J.C., Veldhuizen, A.A., Verkaik, J., Oude Essink, G.H.P., Van Walsum, P.E.V., Delsman, J.R., Hunink, J.C., Massop, H.T.L., Kroon, T., 2014. [An operational, multi-scale, multi-model system for consensus-based, integrated water management and policy analysis: The Netherlands Hydrological Instrument](#). Environ. Model. Softw. 59, 98–108.
- DeConto, R.M., Pollard, D., 2016. [Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise](#). Nature 531, 591–597.
- Delsman, J.R., 2021. Totstandkoming verziltingsrisicokaart Op Waterbasis, Deltares memo 11206870-011.
- Delsman, J.R., America, I., Mulder, T., 2022. [Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel: Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II](#). Deltares rapport 11208039-009-BGS-0001 89.
- 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.
- Delsman, J.R., Oude Essink, G.H.P., Huizer, S., Bootsma, H., Mulder, T., Zitman, P., Romero Verastegui, B., 2020. [Actualisatie zout in het NHI - Toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model](#). Deltares rapport 11205261-003-BGS-0001. Utrecht.
- Deltares, Bosch Slabbers, SWECO, 2021. [Op Waterbasis: Grenzen aan de maakbaarheid van ons water- en bodemsysteem](#).
- Dixon-Jain, P., Norman, R., Stewart, G., Fontaine, K., Walker, K., Sundaram, B., Flannery, E., Riddell, A., Wallace, L., 2014. [Pacific island groundwater and future climates](#). <https://doi.org/10.11636/Record.2014.043>
- Erban, L.E., Gorelick, S.M., Zebker, H.A., 2014. [Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam](#). Environ. Res. Lett. 9, 084010.
- 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.
- Ferguson, G., Gleeson, T., 2012. [Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change](#). Nat. Clim. Chang. 2, 342–345.
- Garner, A.J., Weiss, J.L., Parris, A., Kopp, R.E., Horton, R.M., Overpeck, J.T., Horton, B.P., 2018. [Evolution of 21st Century Sea Level Rise Projections](#). Earth's Futur. 6, 1603–1615.
- General Economics Division (GED), 2018. [Bangladesh Delta Plan 2100. Ministry of Planning Government of the People's Republic of Bangladesh](#).
- Green, T.R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Hiscock, K.M., Treidel, H., Aureli, A., 2011. [Beneath the surface of global change:](#)

- [Impacts of climate change on groundwater](#). J. Hydrol. 405, 532–560.
- Haasnoot, M., Bouwer, L., 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., Plieger, R., Huismans, Y., Sloff, K., Mosselman, E., Lenselink, G., 2018. [Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning](#), Deltares rapport 11202230-005-0002.
- Haasnoot, M., Diermanse, F., 2022. [Analyse van bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland](#), Deltares rapport 11208062-005-BGS-0001.
- Haasnoot, M., Diermanse, F., Kwadijk, J.C.J., De Winter, R., Winter, G., 2019. [Strategieën voor adaptatie aan hoge en versnelde zeespiegelstijging. Een verkenning](#). Deltares rapport 11203724-004 1–65.
- Haasnoot, M., Kwadijk, J.C.J., Van Alphen, J., Le Bars, D., Diermanse, F., Der Van Spek, A., Oude Essink, G.H.P., Delsman, J.R., Mens, M.J.P., Van den Hurk, B., Van der Spek, A.J.F., Oude Essink, G.H.P., Delsman, J.R., Mens, M.J.P., 2020. [Adaptation to uncertain sea-level rise; how uncertainty in Antarctic mass-loss impacts the coastal adaptation strategy of the Netherlands](#). Environ. Res. Lett. 15, 1–24.
- Haasnoot, M., Lawrence, J., Maignan, A.K., 2021. [Pathways to coastal retreat](#). Science 372, 1287–1290.
- Hamers, D., Kuiper, R., Van der Wouden, R., Van Dam, F., Van Gaalen, F., Van Hoorn, A., Van Minnen, J., Pols, L., Risema van Eck, J., 2021. [Grote opgaven in een beperkte ruimte - Ruimtelijke keuzes voor een toekomstbestendige leefomgeving](#). PBL Planbur. voor Leefomgeving.
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R.M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D.L., Hung, W.-C., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., Ye, S., Asia, E., 2021. [Mapping the global threat of land subsidence](#). Science 371, 34–36.
- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Perrette, M., James, R., Tol, R.S.J., 2014. [Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise](#). PNAS 111, 3292–3297.
- Hunink, J.C., Schasfoort, F., Pouwels, J., Mens, M.J.P., 2021. [Het effect van onderwaterdrainage en passieve peilstijging in veenweidegebieden op knelpunten in de zoetwatervoorziening](#). Deltares rapport 11205271-007-ZWS-0001.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. [Climate Change 2022, Impacts, Adaptation and Vulnerability, Working Group II](#).
- Jonkman, S.N., Hillen, M.M., Nicholls, R.J., Kanning, W., van Ledden, M., 2013. [Costs of adapting coastal defences to sea-level rise— New estimates and their implications](#). J. Coast. Res. 290, 1212–1226.
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., 2016. [Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration](#). J. Hydrol. 535.
- KNMI, 2021. [KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert](#).
- KNMI, 2015. [Brochure KNMI klimaatscenario's '14](#), Herziene uitgave 2015.
- Kort, B., Teunis, B., 2020. [Handleiding verdringingsreeks](#). Watermanagementcentrum Ned. 57 p.
- Kuiper Compagnons, 2021. [Perspectief 2121: Land met een plan - Veranderend landschap - Ontwerpen voor de toekomst](#).
- Kwadijk, J.C.J., Haasnoot, M., Mulder, J.P.M., Hoogvliet, M.M.C., Jeuken, A.B.M., Van der Krogt, R.A.A., Van Oostrom, N.G.C., Schelfhout, H.A., Van Velzen, E.H., Van Waveren, H., De Wit, M.J.M., 2010. [Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands](#). Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang. 1, 729–740.
- Kwadijk, J.C.J., Van Vuren, S., Verhoeven, G., Oude Essink, G.H.P., Snepvangers, J.J.J.C., Calle, E., 2007. [Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding: Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het MNP-project "Nederland later."](#)
- Leeuwis-Tolboom, J., Van Loon, A., Van Lith, E., 2021. Bescherming Nationale Grondwater Reserves - Handelingsperspectieven voor het Rijk Klant.
- Ligtvoet, W., Bouwman, A., Bakkenes, M., Beusen, A., Van Bommel, B., De Blois, F., De Bruin, S., Beije, E., Bijlsma, L., Doelman, J., Gernaat, D., Janse, J., Van Puijenbroek, P., De Ruiter, J., Rijn, F. van, De Vos, L., Visser, H., Sperna Weiland, F., Eilander, D., Oude Essink, G., Biemans, H., Gulpne, M., Ward, P., Mortensen, E., Tiggeloven, T., Susnik, J., Veerbeek, W., Wanders, N., Barbarossa, V., Matthijs, B., Mo, C., Jones, R., Tahseen, S., Kind, J., Siderius, C., Ten Brinke, W., Righart, A., Schwandt, K., Bakkum, S., Van Ingen, J., De Jezus, R., Dijkstra, S., Leukeleu, 2023. [The geography of future water challenges; Bending the trend](#), PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Ligtvoet, W., Bouwman, A., Knoop, J., De Bruin, S., Nabielek, K., Huitzing, H., Janssen, J., Van Minnen, J., Gernaat, D., Van Puijenbroek, P., De Ruiter, J., Visser, H., 2018. [The geography of future water challenges](#), PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Mabrouk, M.B., Jonoski, A., Oude Essink, G.H.P., Uhlenbrook, S., 2018. Impacts of sea level rise and groundwater extraction scenarios on fresh groundwater resources in the Nile Delta Governorates, Egypt. Water (Switzerland) 10, 1690. <https://doi.org/10.3390/w10111690>
- Michael, H.A., Russoniello, C.J., Byron, L., 2013. [Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems](#). Water Resour. Res. 49, 2228–2240.
- Nationaal Deltaprogramma Zoetwater, 2021. [Deltaplan Zoetwater 2022 - 2027](#).
- Oude Essink, G.H.P., 2007. [Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied](#). H2O 19, 60–64.
- 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.
- Pauw, P.S., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., 2012. [Groundwater salinisation in the Wadden Sea area of the Netherlands: quantifying the effects of climate change, sea-level rise and anthropogenic interferences](#). Netherlands J. Geosci. - Geol. en Mijnb. 91–3, 373–383.
- Pycroft, J., Abrell, J., Ciscar, J.-C., 2016. [The Global Impacts of Extreme Sea-Level Rise: A Comprehensive Economic Assessment](#). Environ. Resour. Econ. 225–253.
- Rasmussen, P., Sonnenborg, T.O., Goncear, G., Hinsby, K., 2013. [Assessing impacts of climate change, sea level rise, and drainage canals on saltwater intrusion to coastal aquifer](#). Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 421–443.

- Schra, J., Kleinhans, M.G., Cohen, K.M., Haasnoot, M., Middelkoop, H., 2022. [Wat wil de delta? - Uitzicht met inzicht: neogeografische kaarten van het Nederlandse laagland in een toekomst met zeespiegelstijging](#). UU Rapp. 31171979.
- Storlazzi, C.D., Gingerich, S.B., Van Dongeren, A., Cheriton, O.M., Swarzenski, P.W., Quataert, E., Voss, C.I., Field, D.W., Annamalai, H., Piniak, G.A., McCall, R., 2018. [Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding](#). *Sci. Adv.* 4, 1–10.
- Stratelligence, 2021. [Economische analyse Zoetwater](#).
- SWECO, 2021a. [Ruimte voor de toekomst; Flexibel invullen van investeringsopgaven om effecten van zeespiegelstijging in de- toekomst te kunnen opvangen](#).
- SWECO, 2021b. [De investeringsopgave in Deltaprogramma regio's; adaptief en flexibel investeren, voorbereid op de toekomst met zeespiegelstijging](#).
- Swinkels, R., Raadgever, T., 2022. [Kennisprogramma Zeespiegelstijging; Ruimtelijke besluitvorming voor een onzekere toekomst](#) 55 p.
- Tay, C., Lindsey, E.O., Chin, S.T., McCaughey, J.W., Bekaert, D., Nguyen, M., Hua, H., Manipon, G., Karim, M., Horton, B.P., Li, T., Hill, E.M., 2022. [Sea-level rise from land subsidence in major coastal cities](#). *Nat. Sustain.*
- Taylor, R.G., Green, T.R., Scanlon, B.R., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, L.P.H., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L.F., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., MacDonald, A.M., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yechieli, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Shamsudduha, M., Hiscock, K.M., Yeh, P.J.-F., Holman, I., Treidel, H., 2013. [Ground water and climate change](#). *Nat. Clim. Chang.* 3, 1–8.
- Termeer, C.J.A.M., Dewulf, A., Pot, W.D., Biesbroek, G.R., 2016. [Governance strategieën voor waterbeleid - Historische trends en vooruitblik](#).
- Thuy, N.N., Anh, H.H., 2015. [Vulnerability of rice production in mekong river delta under impacts from floods, salinity and climate change](#). *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.* 5, 272–279.
- Tiggeloven, T., De Moel, H., Winsemius, H.C., Eilander, D., Erkens, G., Gebremedhin, E., Diaz Loaiza, A., Kuzma, S., Luo, T., Iceland, C., Bouwman, A., Van Huijstee, J., Ligtvoet, W., Ward, P.J., 2020. [Global-scale benefit-cost analysis of coastal flood adaptation to different flood risk drivers using structural measures](#). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 1025–1044.
- Van Alphen, J., Haasnoot, M., Diermanse, F., 2022. [Uncertain accelerated sea-level rise, potential consequences, and adaptive strategies in The Netherlands](#). *Water (Switzerland)* 14, 16.
- 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., 2016. [Verzoeting en verzilting freatisch grondwater in de Provincie Zeeland; Zeeland model: 3D regionaal zoet-zout grondwater](#), Deltares report 1220185.
- Van den Brink, M., Huismans, Y., Blaas, M., Zwolsman, G., 2019. [Climate change induced salinization of drinking water inlets along a tidal branch of the Rhine River: Impact assessment and an adaptive strategy for water resources management](#). *Climate* 7.
- Van den Hurk, B., Geertsema, T., 2020. [An Assessment of present day and future sea level rise at the Dutch coast; Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust en de regionale bestuurlijke consequenties](#), Waddenacademie, Position paper 2020-05
- Van der Wal, R.S.W., Nicholls, R.J., Behar, D., McInnes, K., Stammer, D., Lowe, J.A., Church, J.A., DeConto, R.M., Fettweis, X., Goelzer, H., Haasnoot, M., Haigh, I.D., Hinkel, J., Horton, B.P., James, T.S., Jenkins, A., LeCozannet, G., Levermann, A., Lipscomb, W.H., Marzeion, B., Pattyn, F., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Price, S.F., Seroussi, H., Sun, S., Veatch, W., White, K., 2022. [A High-End Estimate of Sea Level Rise for Practitioners](#). *Earth's Future.* 10, 1–24.
- Vandenbohede, A., Luyten, K., Lebbe, L.C., 2008. [Effects of Global Change on Heterogeneous Coastal Aquifers: A Case Study in Belgium](#). *J. Coast. Res.* 24, 160–170.
- Vermeersen, B.L.A., Slangen, A.B.A., Gerkema, T., Baart, F., Cohen, K.M., Dangendorf, S., Duran-Matute, M., Frederikse, T., Grinsted, A., Hijma, M.P., Jevrejeva, S., Kiden, P., Kleinherenbrink, M., Meijles, E.W., Palmer, M.D., Rietbroek, R., Riva, R.E.M., Schulz, E., Slobbe, D.C., Simpson, M.J.R., Sterlini, P., Stocchi, P., Van de Wal, R.S.W., Van der Wegen, M., 2018. [Sea-level change in the Dutch Wadden Sea](#). *Geol. en Mijnbouw/Netherlands J. Geosci.* 97, 79–127.
- Vietnam-Netherlands, 2013. [Mekong Delta Plan; Long-term vision and strategy for a safe, prosperous and sustainable delta](#).
- Vu, D.T., Yamada, T., Ishidaira, H., 2018. [Assessing the impact of sea level rise due to climate change on seawater intrusion in Mekong Delta, Vietnam](#). *Water Sci. Technol.* 77, 1632–1639.
- Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Sperna Weiland, F.C., Chao, B.F., Wu, Y.-H., Bierkens, M.F.P., 2012. [Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise](#). *Geophys. Res. Lett.* 39.
- Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Van Kempen, C.M., Reckman, J.W.T.M., Vasak, S., Bierkens, M.F.P., 2010. [Global depletion of groundwater resources](#). *Geophys. Res. Lett.* 37, L20402.
- Wada, Y., Wissler, D., Bierkens, M.F.P., 2014. [Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources](#). *Earth Syst. Dyn.* 5, 15–40.
- Weigelt, P., Jetz, W., Kreft, H., 2013. [Bioclimatic and physical characterization of the world's islands](#). *PNAS* 110, 15307–12.
- Werner, A.D., Simmons, C.T., 2009. [Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers](#). *Ground Water* 47, 197–204.
- Yu, W., Voss, C.I., Michael, H.A., Ahmed, K.M., Feinson, L., Khan, M.R., 2010. [Implications of Climate Change for Fresh Groundwater Resources in Coastal Aquifers in Bangladesh](#).

12. Colofon

Dit Deltafact is opgesteld door Deltares

Auteur:

G.H.P. Oude Essink, Deltares / Universiteit Utrecht

Versie:

1 Augustus 2023

13. Disclaimer

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en informatie zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs, STOWA en de evt. opdrachtgever van deze Deltafact kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.