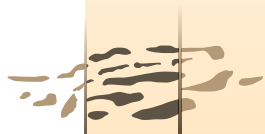




waddenacademie

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

An assessment of present day and future sea level rise at the Dutch coast

Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust
en de regionale bestuurlijke consequenties

Bart van den Hurk
Tjitske Geertsema

Colofon

Auteurs

Bart van den Hurk
Tjitske Geertsema

Grafisch ontwerp omslag

BW H ontwerpers

Fotografie omslag

Jan Huneman

ISBN

978-94-90289-46-1

Position paper 2020-05

Dit onderzoek is door de Waddenacademie wetenschappelijk begeleid en uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door het Programma Naar een Rijke Waddenzee.

PROGRAMMA **NAAR EEN
RIJKE WADDENZEE**

Gepubliceerd door Waddenacademie
© Waddenacademie april 2020

Contactpersoon

Klaas Deen
Secretaris
T 058 233 90 31
E klaas.deen@waddenacademie.nl
www.waddenacademie.nl

De basisfinanciering van de Waddenacademie
is afkomstig van het Waddenfonds.

VOORWOORD

Programma naar een Rijke Waddenzee (PRW) werkt aan een veerkrachtig en duurzaam Waddengebied. Met het perspectief Waddengebied 2050 als stip op de horizon. Dat gebeurt aan de hand van acht thema's: klimaatverandering, natuurlijke dynamiek, onderwaternatuur, vogels, visserij, bereikbaarheid en mobiliteit, randen van het Wad en versterken kernwaarden Werelderfgoed. Deze thema's zijn geclusterd in twee pijlers: natuurverbetering naar een veerkrachtig ecosysteem en transitie naar een duurzaam (economisch) medegebruik.

Klimaatverandering heeft een belangrijk effect op de waddenregio. Vandaar dat dit een kernthema voor het werk van PRW is. Daarbinnen is zeespiegelstijging een potentieel grote bedreiging, voor zowel mens als natuur. Zodoende achten we het van belang om de meest actuele kennis op dit vlak in kaart te brengen.

De Waddenacademie draagt bij aan de duurzame ontwikkeling van het Waddengebied door het verbinden van kennis over het gebied en deze toegankelijk en toepasbaar te maken. Voor deze opdracht is Bart van den Hurk van Deltares, deskundige op het gebied van klimaatverandering, gevraagd een overzicht van de wetenschappelijke state-of-the-art van de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust te maken. De Waddenacademie was verantwoordelijk voor de kwaliteitsbewaking en procesbegeleiding.

Leeuwarden, 14 april 2020

drs. H.J. (Hendrikus) Venema
Programma naar een Rijke Waddenzee

prof. dr. J. (Jouke) van Dijk
Waddenacademie

INHOUDSOPGAVE

1 Uitgebreide Nederlandse samenvatting	6
1.1 Aanleiding, opdrachtgevers en opbouw van de studie	6
1.2 Versnelt de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust?	6
1.3 Is er een discrepantie tussen de KNMI zeespiegelscenario's en de waarnemingen langs de Nederlandse kust?	9
1.4 Hoe moeten we die extreme zeespiegelscenario's interpreteren?	12
1.5 Wat komt er verder op ons af?	14
1.6 Wat kunnen beleidsmakers met deze informatie?	15
 <u>ENGLISH REPORT</u>	
2 Scope of this report	17
3 Introduction	18
4 Observations and scenarios for sea level rise	19
4.1 Drivers of sea level rise	19
4.2 Sea level observations: tide gauges and satellite measurements	22
4.3 Sea level rise projections	22
5 Topics on present day and future sea level rise	24
5.1 Local sea level rise acceleration in relation to global sea level rise	24
5.2 Observations in relation to climate change scenarios	25
5.3 High-end scenarios in relation to a “likely” range of projections	28
6 Expected discussions in the coming decade	29
7 FAQ's	30

1.1 Aanleiding, opdrachtgevers en opbouw van de studie

Nagenoeg iedereen is het erover eens dat de zeespiegel stijgt. Maar daar lijkt de consensus wel zo'n beetje op te houden. De wetenschappelijke berichten volgen elkaar in hoog tempo op, en wijzen nu eens op grote risico's voor onze delta op lange termijn, en dan eens op het feit dat het allemaal erg langzaam gaat. Er zijn uiteenlopende signalen over de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust, inclusief de Waddenzee, en de mate waarin deze wel of niet overeenkomen met de scenario's die in het beleid worden gehanteerd. De openbare reacties op deze berichten zijn al net zo divers. Volgens sommigen leven we in de veiligste delta van de wereld, anderen benadrukken dat we onmiddellijk in actie moeten komen. En deze discussies beperken zich niet tot de landelijke (sociale) media: ook in de bestuurskamers en raadszalen van regionale en landelijke overheden moet er veel – soms ogenschijnlijk tegenstrijdige – informatie worden verwerkt om tot adequate besluitvorming te komen.

Het Programma naar een Rijke Waddenzee (PRW) heeft aan de Waddenacademie gevraagd de meest recente kennis over de huidige en toekomstige zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust en de Waddenzee op een rij te zetten. De Waddenacademie heeft daarvoor VU-IVM benaderd, en Bart van den Hurk (Deltares) heeft deze analyse op zich genomen.

Het rapport behandelt achtereenvolgens drie inhoudelijke hoofdvragen:

- Versnelt de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust?
- Is er een discrepantie tussen de KNMI zeespiegelscenario's en de waarnemingen langs de Nederlandse kust?
- Hoe moeten we die extreme zeespiegelscenario's interpreteren?

Daarna worden de beleidsmatige consequenties besproken, aan de hand van de volgende twee vragen:

- Wat komt er verder op ons af?
- Wat kunnen beleidsmakers met deze informatie?

Het rapport is opgesteld aan de hand van een literatuurstudie en inhoudelijke interviews met Nederlandse experts op het gebied van zeespiegelstijging. Deze interviews zijn in de Nederlandse samenvatting opgenomen als citaten, vooral bedoeld om de leesbaarheid voor de primaire doelgroep van dit rapport – regionale en nationale beleidsmakers en professionals in het domein van zeespiegelstijging en gevolgen daarvan – te bevorderen. Het rapport is inhoudelijk gereviseerd door de geraadpleegde experts en door medewerkers van PRW en Waddenacademie.

1.2 Versnelt de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust?

De huidige stijgsnelheid (~2 mm/jaar langs de NL kust) zal voorlopig voor Nederland niet tot grote problemen leiden. Wereldwijd stijgt de zeespiegel momenteel gemiddeld 2 keer zo snel, en is aan het versnellen: werd er over de laatste 80 jaar een gemiddelde stijging van 2.4 mm/jaar, in de laatste 10 jaar is dat opgelopen tot 3.9 mm/jaar, en versnelt verder tot 4.3 mm/jaar over de laatste 5 jaar¹. De Zeespiegelmonitor van Deltares concludeert dat er langs de Nederlandse kust over de laatste 100 jaar geen versnelling is geweest².

¹ <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

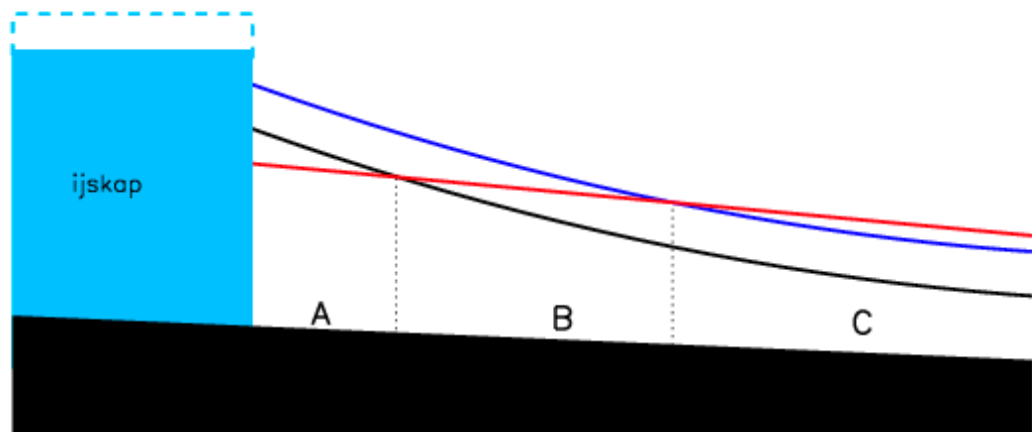
² <https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/Zeespiegelmonitor-2018-final.pdf>

Zeespiegelstijging hangt samen met een flink aantal factoren. Sommige zijn mondiaal en zijn pas op lange termijn merkbaar. Andere zijn zeer plaatselijk en hebben een korte tijdschaal. De belangrijkste factoren voor de wereldgemiddelde zeespiegelstijging op een rij (met tussen haakjes de relatieve bijdrage aan de gemiddelde zeespiegelstijging rond 2010). De aangegeven tijdschalen geven aan hoe lang het duurt voor het gegeven 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 (niet helemaal evenredig) wereldwijd, 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, 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 een soms grote rol maar dragen niet bij aan de wereldgemiddelde zeespiegelstijging:

- Lokale bodemdaling: sterk regionaal verschillend, soms 10-tallen mm/jaar;
- 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;
- 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.



Figuur 1: Illustratie van het effect van grootschalig massaverlies van een ijskap. De zwarte lijn is het zeeniveau van de uitgangssituatie, waarbij het zeewater door de ijskap wordt aangetrokken. De blauwe lijn illustreert een stijging van het zeeniveau door massaverlies van de ijskap, ervan uitgaande dat die massa zich evenredig verdeelt. De rode lijn houdt daarnaast rekening met het effect van het massaverlies op het zwaartekracht-effect. In zone A daalt de zeespiegel, in zone B stijgt die wel maar minder hard dan bij een evenredige massaverdeling, in zone C stijgt de zeespiegel juist meer dan bij evenredige verdeling. Voor Groenland ligt Nederland in zone B, voor Antarctica in zone C.

Aimée Slangen (NIOZ), een van de auteurs van het komende IPCC klimaatrapport: "De versnelling die mondiaal gemiddeld wordt waargenomen vindt haar oorsprong vooral in het uitzetten van steeds warmer wordend zeewater, en toenemend massaverlies van de grote ijskappen en gletsjers." Nu verandert bij een smeltende ijskap niet alleen de hoeveelheid water in zee, maar ook het zwaartekrachtveld eromheen. In de buurt van grote massa's (zoals ijskappen of gebergten) vinden we een relatief hoge gemiddelde zeespiegel: de massa van de ijskappen trekt

immers de andere massa (het zeewater) aan. Bij verlies van die ijsmassa zal het zeeniveau in de onmiddellijke nabijheid van zo'n ijskap dus dalen. Elders gaat de zeespiegel juist stijgen (zie Figuur 1).

Roderik van de Wal (UU), die meeschreef aan het speciale IPCC-rapport over oceanen en ijskappen: "Nederland ligt ten opzichte van Groenland vrij gunstig: massaverlies van die ijskap laat bij ons het zeeniveau slechts 20 à 30% stijgen ten opzichte van de wereldgemiddelde bijdrage. Massaverlies van Antarctica is een ander verhaal: dat leidt juist tot een onevenredig grote toename (100 – 120%) van de zeewaterstand langs onze kusten."

Een andere factor die van groot belang is voor de zeespiegel aan onze eigen kust is dat het waargenomen jaargemiddelde zeeniveau erg varieert van jaar tot jaar. Fedor Baart, hoofdautor van de Zeespiegelmonitor: "Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de invloed van stormen en harde wind, die een flinke opzet van de zeewaterstand veroorzaken.

Dit zijn maar kortdurende gebeurtenissen, maar een jaar met meer stormen laat doorgaans een hoger gemiddeld zeeniveau zien dan kalmere jaren." Op mondiale schaal middelen de waterstandverschillen veroorzaakt door stormen uit: het opgestuwde water wordt immers aangevoerd van andere locaties, waar het zeeniveau dan lager is (Zie Figuur 2).



Figuur 2: Stormopzet op 1 maart in 2020, op basis van GLOSSIS³. Water uit de Noord Atlantische Oceaan wordt door wind en luchtdrukverschillen naar de Noordzee opgestuwd.

De zeespiegel langs de Nederlandse kust stijgt niet overal even hard. Figuur 3 (linker panel) toont naast de gemiddelde zeespiegel ook de waarnemingen in Harlingen (gemiddelde zeespiegelstijging 1.32 mm/jaar) en Delfzijl (1.75 mm/jaar). Door verschillen in de bijdrage van lokale bodemdaling, stormopzet, getij en zandtransport is de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust niet uniform.

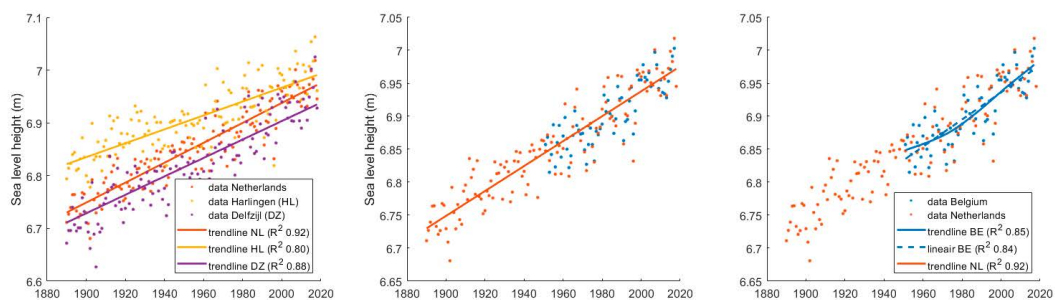
Door de grote variabiliteit van het zeeniveau langs de Nederlandse kust is het niet eenvoudig om een trendlijn vast te stellen. Zo'n trendlijn wordt gebruikt om de invloed van lokale variabiliteit te onderscheiden van een algemeen stijgende lijn (de gemiddelde zeespiegelstijging). In de Zeespiegelmonitor worden verschillende trendlijnen gebruikt om de data langs de Nederlandse kust te beschrijven. Een mogelijk knippunt in de snelheid wordt gevonden in 1994, waar de zeespiegel een minimum vertoont. Over de gehele analyseperiode is de genoemde 2 mm/jaar

³ GLOSSIS = Global Storm Surge Information System; <https://www.deltares.nl/en/projects/global-storm-surge-information-system-glossis/>

stijging langs de Nederlandse kust een goede schatting voor de gemiddelde zeespiegelstijging. Medewerkers van de TU Delft hebben onlangs een analyse uitgevoerd die wijst op de mogelijkheid van een versnelde zeespiegelstijging na 1993⁴. Analyse van Belgische zeespiegelmetingen vanaf midden 20^e eeuw van de Vlaamse Milieumaatschappij⁵ leidt eveneens tot de conclusie dat er sprake is van een versnelde zeespiegelstijging.

Het voorbeeld in Figuur 3 vergelijkt het verloop van de waargenomen jaargemiddelde zeespiegelstand voor de Belgische en Nederlandse kust (met verschillende tijdreekslengtes), en toont verschillende vormen van trendlijnen om die stijgende trend weer te geven. Een lineaire trendlijn veronderstelt geen versnelde zeespiegelstijging, terwijl een trendlijn die met de tijd steeds steiler gaat lopen wel een versnelling weergeeft. Deze lijnen kunnen met ongeveer evenveel statistische zekerheid door de Belgische datapunten worden getrokken, en er kan dus op grond van de waarnemingen moeilijk een keuze gemaakt worden uit deze lijnen.

Conclusie: in een relatief klein gebied zoals de Nederlandse kust kan een eventuele versnelling van de mondiale zeespiegelstijging niet duidelijk worden gedetecteerd vanwege de grote variabiliteit van jaar tot jaar en de invloed van lokale morfologische processen. We weten dat een van de belangrijkste factoren achter een mondiale versnelling van de zeespiegelstijging – massaverlies van de Groenlandse ijskap – aan de Nederlandse kust slechts een geringe bijdrage geeft. Massaverlies van de Antarctische ijskap zou een grotere invloed hebben op de zeespiegelstijging in Nederland, maar is op dit moment nog geen dominante factor in de versnelling.



Figuur 3: Linker panel: gemeten zeespiegel langs de Nederlandse kust²; oranje = gemiddelde van 6 kuststations, geel = datapunten bij Harlingen, paars = datapunten bij Delfzijl. Middelste en rechter panel: Gemeten zeespiegel langs de Nederlandse (oranje punten) en de Belgische kust (blauwe punten) tussen 1880 en 2020, met (midden) gegevens met een lineaire trendlijn door de Nederlandse data, en (rechts) verschillende trendlijnen door de Belgische data (getrokken lijn: polynoom zoals gerapporteerd op website die een versnelling laat zien⁵; streeplijn: lineaire fit die geen versnelling laat zien). Statistisch zijn beide trendlijnen ongeveer even goed om de waargenomen stijging te beschrijven.

1.3 Is er een discrepantie tussen de KNMI zeespiegelscenario's en de waarnemingen langs de Nederlandse kust?

Klimaatsscenario's zijn in het algemeen bedoeld om mogelijke toekomstige klimaatomstandigheden te vergelijken met de huidige situatie. Ze ondersteunen onder andere besluitvorming over de te volgen adaptatiestrategie, robuustheid van grootschalige infrastructuur, ruimtelijke inrichting etc. In de jaren '80 van de vorige eeuw, toen de eerste systematische verkenningen van klimaatverandering en mondiale opwarming verschenen, zijn de eerste klimaatscenario's

⁴ https://flowsplatform.nl/#/monitoring-for-timely-adaptation-to-sea-level-rise--the-likelihood-of-an-acceleration-based-on-tide-gauge-data-1581422350835____566____

⁵ <https://www.milieuraapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/zeeklimaat/zeeniveau>

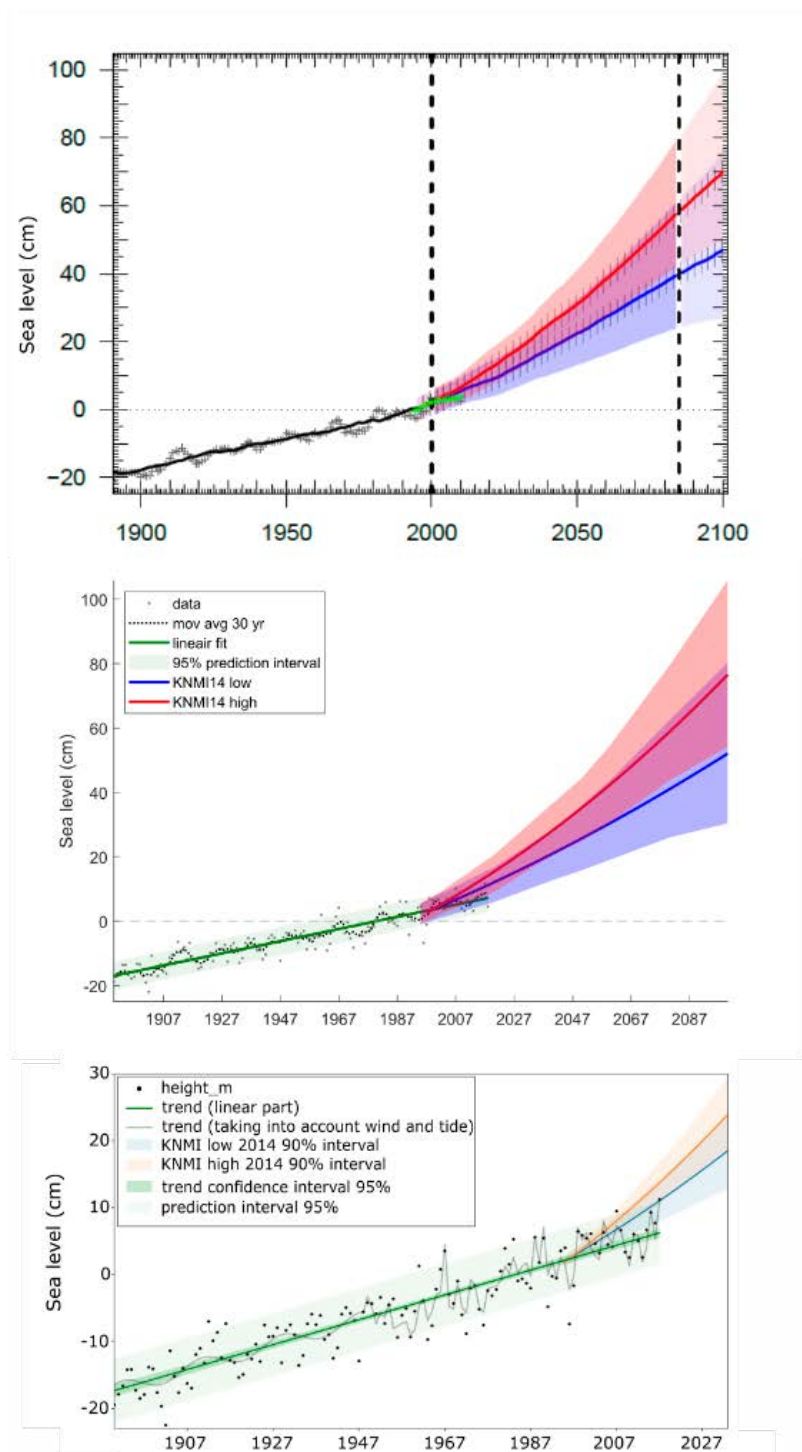
opgesteld. In onze waarnemingen kunnen we bepaalde kenmerken en gevolgen van klimaatverandering steeds beter vaststellen, en kunnen we dus ook nagaan waar de lange termijn trends zich bevinden binnen de bandbreedte van eerder opgestelde klimaatscenario's. Sommige studies geven aan dat de eerdere scenario's achterlopen bij de geregistreerde zeespiegelstijging. In de Zeespiegelmonitor van 2019 wordt juist gesteld dat de zeespiegel minder is gestegen dan de KNMI'14 zeespiegelscenario's aangeven. We zetten wat elementen op een rij die van belang zijn voor de interpretatie van waarnemingen in lokale waterstandveranderingen, en lange termijn klimaatscenario's.

De waarnemingen en scenario's laten zich niet direct met elkaar vergelijken. Klimaatscenario's beschrijven lange termijn trends en houden rekening met schommelingen van die trends door interne variabiliteit. De waarnemingen vormen slechts één realisatie van alle mogelijke fluctuaties van het zeeniveau vanaf een bepaald moment. Er kunnen langjarige fluctuaties ten grondslag liggen aan de waarnemingen die niet in de scenario's meegenomen worden. Een verschil tussen waarnemingen en scenario's in een relatief kort tijdvak is dus niet noodzakelijkerwijs een indicatie voor inconsistentie.

Bovendien worden waarnemingen en scenario's voor verschillende toepassingen gebruikt. Baart: "De informatie die je nodig hebt hangt sterk af van het beleidsonderwerp. Korte-termijn planning zoals zandsuppleties voor kustlijnonderhoud vraagt om een zorgvuldige registratie van de opgetreden zeespiegelstijging en de korte-termijn extrapolatie daarvan. Voor de planning op langere termijn zijn scenario's nodig."

Sybre Drijfhout (KNMI), medeopsteller van de KNMI'14 scenario's: "Zeespiegelscenario's zijn niet gemaakt om alle waargenomen fluctuaties van het zeeniveau langs de Nederlandse kust in beeld te brengen. Fluctuaties in zeewaterstand (bijvoorbeeld door stormen) zijn weliswaar groot maar als het aantal stormen in de toekomst niet noemenswaardig verandert dragen die niet bij aan de gemiddelde zeespiegelstijging." En een significante verandering van het aantal stormen is niet duidelijk zichtbaar in de KNMI'14 klimaatscenario's of de onderliggende klimaatmodellen. Ook variaties in de ruimtelijke verdeling van warmteopslag in de zee leidt tot ruimtelijke spreiding in het zeeniveau. En veel van die variaties zijn vrij willekeurig en niet voorspelbaar: op lokaal niveau worden ze bepaald door sterk fluctuerende weersomstandigheden, en wat dat betekent voor het zeeniveau in, zeg 2043, is volstrekt onbekend. Dus voor een goede vergelijking tussen waarnemingen en scenario's moeten we die fluctuaties eerst wegfilteren. Voor snelle fluctuaties zoals het aantal stormen kan dat bijvoorbeeld door alleen het (lopende) gemiddelde zeeniveau over een aantal 10-tallen jaren te tonen. Maar zelfs op die langere tijdschaal kan het lokale zeeniveau flink variëren op een manier die moeilijk is te voorspellen. Drijfhout: "Oceaanstromingen bevatten grote wervels die soms langzamer of sneller bewegen. Net zoals het oppervlak van een kop koffie waarin je flink roert niet glad is vertoont ook het zeeniveau forse variaties die samenhangen met die wervels. De draaiing en posities van die wervels fluctueren op langere tijdschalen van soms enkele 10-tallen jaren, en dat kan zorgen voor lokale variaties van centimeters zeeniveau. Dat betekent dat de actuele zeespiegel in de nabije toekomst flink kan variëren. De directe vergelijking met waarnemingen is daarom moeilijk te maken." En dan hebben we het nog niet eens gehad over het feit dat klimaatscenario's ook zijn omgeven met onzekerheid door het gebrek aan overeenstemming tussen de diverse klimaatmodellen.

Daarnaast moeten we rekening houden met lokale factoren zoals bodemdaling. Baart: "Gemiddeld over de meetstations voor zeespiegel aan de Nederlandse kust daalt de bodem met 0.45 mm/jaar. Bovendien was de gemiddelde zeespiegel in de periode 1986-2005, die gebruikt is als referentie voor de scenario's, 2cm hoger dan NAP. Daarvoor hebben we een correctie aangebracht."



Figuur 4: Bovenste figuur: weergave van scenario's en waarnemingen gepubliceerd door KNMI⁶. Onderste figuur: presentatie van de KNMI zeespiegelscenario's en waarnemingen in de Zeespiegelmonitor². In de bovenste figuur hebben de scenario's een referentieniveau van 0 cm in 1995 en bevatten geen bodemdaling. Ook zijn historische waarnemingen gefilterd met een 5-jaarlijks lopend gemiddelde, en is er sprake van een onzekerheidsbandbreedte vanaf het startpunt. In de middelste figuur zijn de scenario's afgezet tegen het NAP referentieniveau in 1995 en is bodemdaling van 0.45 mm/jaar toegevoegd, waardoor dezelfde scenario-lijnen worden verkregen als in de onderste figuur.

⁶ <http://www.klimaatsscenario's.nl/>. Zie ook De Vries, H., Katsman, C., and S. Drijfhout (2014), Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways, Environ. Res. Lett., 9, 115007, doi:10.1088/1748-9326/7/4/044035

Figuur 4 geeft verschillende weergaven van de vergelijking tussen de zeespiegelmetingen en de KNMI'14 zeespiegelscenario's. De correcties voor bodemdaling en het NAP niveau verschuiven de oorspronkelijke scenario's wat naar boven. Maar de trendlijn en de gefilterde tijdreeks vallen nog steeds binnen de bandbreedte van de lage scenario's in de overlappende periode. Wel is duidelijk te zien dat vooral in de hoge zeespiegelscenario's op afzienbare termijn een duidelijke versnelling in de zeespiegelstijging plaatsvindt, die in lijn is met de geprojecteerde waarden aan het eind van de 21^e eeuw. De versnelling in deze scenario's hangt onder meer samen met het lokale effect van een verwachte uitzetting van zeewater en massaverlies van Groenland en Antarctica.

Conclusie: *De waargenomen zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust valt binnen de bandbreedte van de lage KNMI'14 zeespiegelscenario's. Er zijn verschillende factoren die een verschil tussen waarnemingen en eerder opgestelde zeespiegelscenario's voor een overlappende periode kunnen verklaren. De waarnemingen hebben vooral betekenis voor korte-termijn beleid zoals zandsuppleties. Klimaatscenario's zijn primair bedoeld voor beleid op langere termijn. Vooral de hoge zeespiegelscenario's projecteren een duidelijke versnelling in de zeespiegelstijging in de toekomst.*

1.4 Hoe moeten we de extreme zeespiegelscenario's interpreteren?

Hoewel onze data en methoden steeds beter worden, is er nog veel onzekerheid over de kwaliteit van de klimaat- en ijskapmodellen. Er is veel onzekerheid over de kwaliteit van die modellen. Veel belangrijke processen zijn nog maar deels begrepen, en het is ook niet altijd duidelijk hoe je al die, vaak onderling afhankelijke, processen in een klimaatmodel moet stoppen. "Daarom gebruiken we doorgaans ook meerdere modellen, dat geeft in ieder geval een indruk van de onzekerheid in de kennis die we hebben over de processen" zegt Michiel van den Broeke van het IMAU (UU). "Vooral de bijdrage van Antarctica is erg onzeker. In sommige modelstudies loopt deze bijdrage op tot ruim een meter zeespiegelstijging aan het eind van de 21^e eeuw, maar dat is inmiddels een erg onwaarschijnlijk scenario. En het is ook onduidelijk of afsmelten van delen van de ijskappen omkeerbaar is of niet. Om dat te weten moeten we veel meer waarnemingen doen en ook veel meer modelsimulaties uitvoeren. In de loop van de komende 5 tot 10 jaar zullen we daar belangrijke resultaten van kunnen verwachten", is zijn inschatting.

De Nederlandse KNMI'14 scenario's, maar ook de mondiale scenario's van IPCC, representeren een bepaalde bandbreedte aan mogelijke toekomst van ons klimaat. Ook wordt een inschatting gemaakt van de plausibiliteit van deze scenario's. De KNMI'14 en IPCC rapportages geven een bandbreedte⁷ van 17 tot 83% waarschijnlijkheid. Dit is een indicatie van de huidige stand van de kennis over de kwaliteit van de modellen en waarnemingen. Bij de meeste beleidsbeslissingen wordt rekening gehouden met die "likely" bandbreedte. De Deltascenario's zijn rechtstreeks afgeleid van de KNMI'14- en IPCC scenario's, en zijn maatgevend voor diverse ontwerp- en implementatierichtlijnen voor onze waterveiligheid, toekomstige landinrichting en andere beleidsonderwerpen.

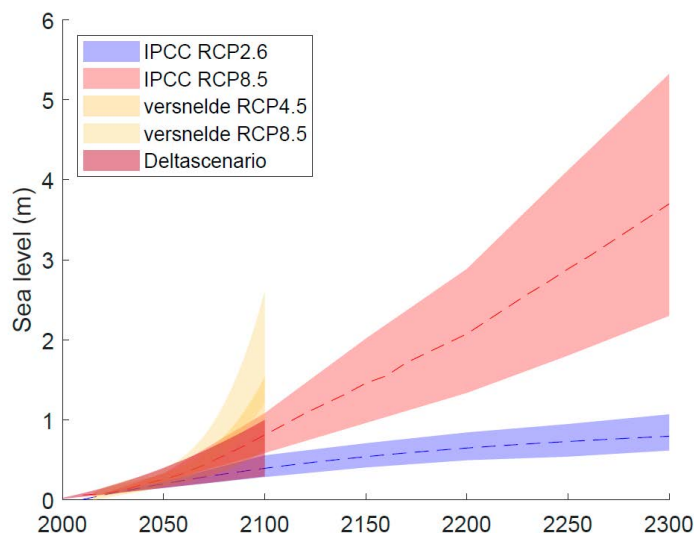
De gebruikte bandbreedte omvat echter niet alle onzekerheidsfactoren. Dewi Le Bars, zeespiegelexpert bij het KNMI: "Het maakt nogal uit of de wereldbevolking in staat is om de mondiale opwarming te beperken tot 2°C of dat we toch op hogere waarden uitkomen. De stabiliteit van de grote ijskappen is erg afhankelijk van de temperatuur in de poolstreken.

⁷ IPCC hanteert voor de classificatie "likely" een onzekerheidsmarge van 66% (17 – 83%); zie https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf

Er zijn scenario's denkbaar waarbij een aantal fysische processen op die ijskappen nèt verkeerd uitpakken en een ongeëvenaard groot massaverlies optreedt." Een serie "worst case" aannames in ijskapmodellen en zeespiegelprojecties, gebaseerd op een studie uit 2016, leidde tot mogelijk 2.5 m zeespiegelstijging aan het eind van de 21^e eeuw⁸, en nog veel hogere waarden als we verder vooruit kijken. Figuur 5 toont hoe we die extreme worst case zeespiegelscenario's moeten zien in relatie tot de gepubliceerde scenario's van KNMI en IPCC. We kunnen niet aangeven hoe groot de kans is dat ze zullen optreden. Maar we kunnen ze wel gebruiken voor verre toekomstverkenningen. De figuur laat zien dat ook de IPCC scenario's rekening houden met hoge waarden voor zeespiegelstijging, zij het dat deze hoge waarden pas in de loop van een aantal eeuwen op zullen treden.

Hoe moeten we die verschillende scenario's eigenlijk interpreteren? "Een waarschijnlijk scenario is niet altijd hetzelfde als een relevant scenario", zegt ook Jeroen Aerts (VU), specialist in risicomanagement. "Voor Nederland hangt er zoveel af van de toekomstige zeespiegel dat we het ons niet kunnen permitteren om helemaal geen rekening te houden met die extreme scenario's." Maar je kunt ook niet nu al het hele beleid richten op die meest extreme zeeniveaus met een onbekende kans dat die ook gaan optreden. "Onder dit soort zeer onzekere omstandigheden moet je beleid voeren dat mee kan bewegen met nieuwe inzichten, of met nieuwe maatschappelijke ontwikkelingen" vult Marjolijn Haasnoot (Deltares) aan. "We kunnen adaptatiepaden in kaart brengen die duidelijk maken of en hoe hedendaagse beslissingen de mogelijkheid open laten om in de toekomst aanvullende maatregelen te nemen die anticiperen op meer extreme scenario's." Deze adaptieve aanpak geeft houvast bij ingrijpende beleidskeuzes die op korte termijn genomen moeten worden. Ter ondersteuning van een adaptieve aanpak is goede monitoring nodig van processen die een dominante rol spelen bij Zeespiegelstijging. Hiermee krijgen we inzicht of en wanneer geplande opties geïmplementeerd moeten worden of dat bijsturen van het plan nodig is. "Een goed ingericht "Early Warning" systeem kan een indicatie geven van zeespiegel-processen die in de komende decennia kunnen optreden, en kan aangeven wanneer ingegrepen moet worden. Door internationaal samen te werken, de dynamiek van de ijskappen te monitoren, en onze kennis en toekomstverwachtingen regelmatig van een update te voorzien heb je meer gelegenheid om belangrijke ontwikkelingen tijdig te signaleren", aldus Michiel van den Broeke.

⁸ Een mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging van 2.5 m in 2100 is uitgerekend door Le Bars et al (2017), uitgaande van een wetenschappelijke publicatie van De Conto & Pollard uit 2016, waarbij de gevolgen van een aantal processen in kaart werden gebracht die bijdragen aan een instabiele reactie van de Antarctische ijskap op mondiale temperatuurstijging. In een latere studie hebben De Conto & Pollard een aantal aannames naar beneden bijgesteld, en dat leidt ertoe dat diezelfde (kleine) kans op een zeespiegelstijging van 2.5 m pas een aantal decennia later op zal treden.



Figuur 5: Verloop van mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging in de komende eeuwen volgens verschillende scenario's. De "likely" range, gepubliceerd door IPCC medio 2019⁹ is gecombineerd met een "likely" bandbreedte aan scenario's van Le Bars et al (2017 ("versnelde RCP"), die uitgaan van fysische processen die leiden tot snel massaverlies van Antarctica en gebruikt zijn in de Deltares verkenningen naar extreme zeespiegelstijging¹⁰. De IPCC scenario's en de scenario's van Le Bars et al (2017) zijn gemaakt voor verschillende RCPs¹¹, die gerelateerd zijn aan de broeikasgas-uitstoot en mate van opwarming.

1.5 Wat komt er verder op ons af?

Zeespiegelstijging is een onderwerp waar – bijna paradoxaal – de onzekerheid over toekomstige omstandigheden lijkt toe te nemen naarmate er meer studies worden verricht. We worden gewezen op risico's die we voorheen nog niet in beeld hadden doordat nieuwe metingen en modellen beschikbaar komen. IPCC heeft in haar laatste rapportage de "likely" bandbreedte van zeespiegelscenario's voor de 21^e eeuw naar boven bijgesteld ten opzichte van het rapport uit 2014. De rapporten geven steeds een beoordeling van de wetenschappelijke inzichten op een bepaald moment. En die inzichten blijven zich ontwikkelen. Een nieuwe generatie klimaatmodellen dient zich aan met mogelijk andere uitkomsten van eerdere klimaatberekeningen. Er zullen nieuwe generaties ijsmodellen worden gepubliceerd waarmee gekoppelde ijs-klimaat berekeningen zullen worden gemaakt. Er zullen ook studies verschijnen die bepaalde processen juist uitsluiten, wat er misschien toe kan leiden dat de meest extreme projecties naar beneden kunnen worden bijgesteld. Ook zullen metingen en modelstudies onze "Early Warning" capaciteit waarschijnlijk vergroten, waardoor we betere indicaties krijgen over ontwikkelingen die wat verder in de toekomst liggen.

⁹ <https://www.ipcc.ch/srocc/>. Noot dat IPCC de bandbreedte van scenario's voorbij 2100 met "low confidence" presenteert, terwijl scenario's tot 2100 een "medium confidence" hebben

¹⁰ <https://www.deltares.nl/nl/issues/gevolgen-zeespiegelstijging/>; de "versnelde" scenario's zijn gemaakt met verschillende bandbreedtes die onzekerheid in globale opwarming en modelrepresentatie weergeven. In Figuur 4 is dezelfde "likely" bandbreedte getoond als gebruikt voor de IPCC scenario's.

¹¹ RCP = Representative Concentration Pathway

1.6 Wat kunnen beleidsmakers met deze informatie?

Voor het Nederlandse waterbeheer is het van belang om te weten hoe groot de onzekerheden zijn en waar deze vandaan komen. De belangen zijn immers groot en er zullen nog veel risico-afwegingen moeten worden gemaakt.

In de komende jaren zal de beschikbare informatie zeker toenemen, maar dit zal niet altijd leiden tot minder onzekerheid. Toch zijn er wel wat handvaten te geven.

De zeespiegelmetingen aan de Noordzeekust zijn niet representatief voor de mondiaal gemiddelde zeespiegel. Net als het gegeven dat de trend in een langjarige temperatuur-waarneming op een enkel meetstation niet gelijk kan worden verondersteld aan de mondiale temperatuurstijging, is de trend langs de Nederlandse kust niet gelijk aan de mondiale zeespiegelstijging. Er zijn geen theorieën die erop wijzen dat de zeespiegel in de Noordzee kust langdurig ontkoppeld zal zijn van de mondiale zeespiegel. Dat betekent dat op langere termijn de processen die de mondiale zeespiegel beïnvloeden ook in de Noordzee merkbaar zullen zijn, waarbij lokale factoren als bodemdaling en zwaartekracht effecten van veranderende ijsmassa's wel blijven meetellen.

Beleidsbeslissingen of investeringen die een reikwijdte hebben van 10 – 30 jaar zijn niet heel erg gevoelig voor verschillende zeespiegelscenario's. De scenario's zelf gaan pas vanaf ca. 2050 sterk uit elkaar lopen, en in de tussentijd is het zeer aannemelijk dat nieuwe informatie beschikbaar komt over het verloop van de zeespiegel in de periode daarna. Voor een beslissingshorizon richting het eind van de 21^e eeuw is "risicotolerantie" een belangrijk begrip. Als het beleid mee kan bewegen met nieuwe ontwikkelingen en inzichten, kunnen risico's wellicht worden opgevangen door continue monitoring van de ontwikkelingen en open houden van opties. Als de besluitvorming weinig flexibel is, bijvoorbeeld omdat het infrastructuur betreft die niet makkelijk opschaalbaar gemaakt kan worden kunnen hogere scenario's mogelijk belangrijke inzichten geven over lange termijn risico's waar die infrastructuur aan kan worden blootgesteld.

Zeespiegelstijging is een fenomeen met een lange tijdschaal. De snelheid waarmee de zeespiegel stijgt zal niet snel afnemen, omdat die stijging grotendeels veroorzaakt wordt door trage processen: uitzetten van warm water, en grootschalig massaverlies van de grote ijskappen. Dat proces is de laatste decennia op gang gekomen, en de zeespiegel zal nog lang blijven stijgen. Het is niet alleen van belang om een beeld te krijgen welk zeeniveau wordt voorzien voor een bepaalde periode in de toekomst, maar ook om een beeld te krijgen van het moment waarop een bepaald zeeniveau wordt bereikt. Extreem hoge zeeniveaus zijn op korte termijn niet waarschijnlijk, maar zullen zich op een gegeven moment voordoen. Het is van belang om de lange termijn in de gaten te blijven houden door middel van scenario's en om tegelijkertijd te beginnen met aanpassingen die een lange voorbereidings- en planningshorizon hebben.

An assessment of present day and future sea level rise at the Dutch coast

ENGLISH REPORT

2 Scope of this report

The Netherlands is a country where sea level rise has always been and will continue to be a topic that requires proper attention to safeguard the country's future. It is a recognized topic in the track records of many scientists, engineers and public government professionals. Interaction between these groups is very diverse, and not always leading to mutual understanding and appreciation of physical, socio-economic or political contexts. Publications and media coverage of scientific findings sometimes leads to confusion or apparently contradicting results.

That is why the Programme towards a Rich Wadden Sea has requested the Waddenacademy in the Netherlands to compile a brief guidance document to reveal some outstanding topics concerning measured and projected sea level rise, in order to provide professional governmental policy makers with improved understanding of the scientific background of these topics. The Waddenacademy has assigned Deltares staff member Bart van den Hurk to compile this report.

In this (English) section a survey of some topics is given. It is not intended to provide a full analysis of all relevant notions and publications, nor does it intend to review past publications on the topic. Rather it focuses at displaying context and rationale of past publications on these topics, zooming in on those elements that may seem contradictory or lead to confusion. The work is based on a desktop literature survey and an interview with Dutch experts on the topic. A Dutch extensive summary is preceding this report. In this summary a selection of Dutch experts is quoted to give the reader a reference to the current state of the art in knowledge on specific topics.

3 Introduction

Averaged over the past 80 years the global mean sea level rose by 2.4 mm/year. Over the past 10 and 5 years, this rise has accelerated to 3.1 and 4.2 mm/year, respectively¹². At the coast of the Netherlands, the sea level is rising 2 mm/year. In the Zeespiegelmonitor no acceleration is detected over the 20th century¹³. These apparent inconsistencies between global mean and local sea level rise generate questions and discussions in the public debate on for instance climate mitigation and coastal adaptation strategies.

In this report an assessment of present day and future sea level rise is given, to provide a scientific background in the related public debates. We start with a discussion on the present-day sea level rise acceleration. Subsequently, we discuss the consistency between sea level rise observations and future sea level projections along the North Sea coast, followed by a discussion on different future sea level projections and their interpretations.

In the next chapter, an overview is given of the drivers, the measurements and used scenarios for sea level rise. Chapter 3 elaborates on the themes of this report, and Chapter 4 will look forward to expected upcoming new discussions on the topic. This document concludes with a FAQ and definitions used in the documentation.

¹² <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

¹³ <https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/Zeespiegelmonitor-2018-final.pdf>

4 Observations and scenarios for sea level rise

Multiple processes drive changes in global and regional sea level. In this chapter, an overview is given of drivers of sea level rise, the measurements of these drivers and a suite of future projections.

4.1 Drivers of sea level rise

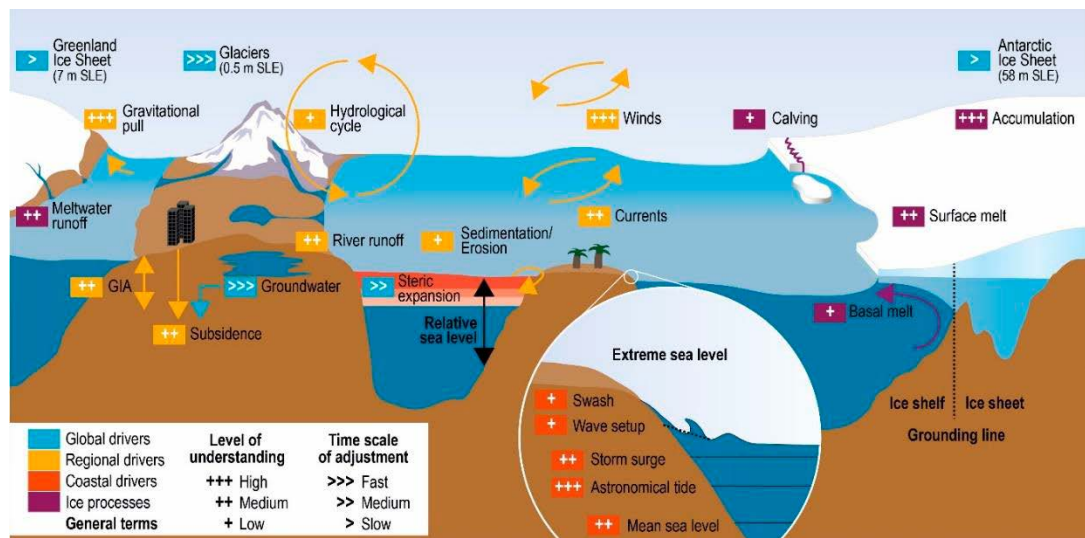


Figure 1: "A schematic illustration of the climate and non-climate driven processes that can influence global, regional (green colours), relative and extreme sea level (ESL) events (red colours) along coasts. Major ice processes are shown in purple and general terms in black. SLE stands for Sea Level Equivalent and reflects the increase in GMSL if the mentioned ice mass is melted completely and added to the ocean¹⁴.

Figure 1 describes the different physical processes influencing sea level rise. The most important drivers on the global scale are thermal expansion (so-called steric effects) of the ocean (explaining 39% of observed sea level rise from 2006 to 2015¹⁵), melt of the ice sheets of Greenland (22%) and Antarctica (12%) and glacier melt (17%). 10% of sea level rise in 2010 may be caused by decreased terrestrial water storage or other unspecified drivers. The contribution of melting land ice increased in the past decades, especially the contribution of the Greenland ice sheet (Figure 2).

¹⁴ https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/4-1-synthesis/4-1-2-future-sea-level-rise-and-implications-for-responses/ipcc-srocc-ch_4_4/

¹⁵ <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>
Table 4.1

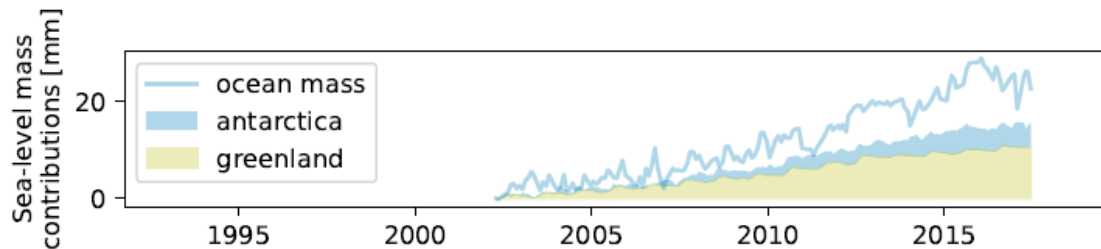


Figure 2: Change in ocean mass attributed to ice mass loss from Greenland and Antarctica. The seasonal variation has been removed. Courtesy to “Zeespiegelmonitor”¹³: Figure 2.2.

As shown in Figure 1, the different drivers have a specific temporal and spatial scale at which they influence the sea level rise (Table 1). This combination of drivers results in a large variation of expected sea level rise at regional and local scale (Figure 3). The projected sea level rise in Japan by the end of the 21st century is, for example, three times larger than the global mean¹⁶, while the sea level is decreasing near the Greenland west coast.

Gravitational attraction (“gravitational” pull in Figure 1) contributes strongly to spatial sea level rise variability. It reflects the gravity effect of large ice sheets, such as Greenland and Antarctica, attracting sea water mass leading to a tilt in the mean sea level (Figure 4). Greenland ice mass loss will increase the ocean volume but simultaneously reduces the gravity pull on nearby sea water. This leads to a non-uniform spatial distribution of sea level, with a proportionally larger sea level rise far away from the ice sheet on the Southern Hemisphere, and a smaller and even negative sea level rise on the Northern Hemisphere nearby. The ice melt in Antarctica has the opposite effect, with a proportionally larger impact on Northern Hemisphere sea level rise.

Thermal expansion is another major contributor to sea level rise. This process does not change the mass of ocean water but will increase the volume. The amount of volume increase per unit temperature increase highly depends on the background temperature and depth at which the temperature increase takes place. Also, thermal expansion thus leads to a spatially non-uniform change of the depth of the ocean column. This may lead to systematic changes in the circulation patterns of the ocean currents.

Regional and temporal variability in sea level is governed by regional drivers, such as land subsidence, adjustment of the earth crust to changing ice mass (‘glacial rebound’), heat uptake, wind, tides, storms and currents (see Table 1). Depending on the region of interest, these drivers amplify or reduce sea level (rise) locally. For the North Sea, Frederikse et al (2016)¹⁷ have compiled a sea level budget for the period 1958-2014. They successfully reconstruct observed variations at decadal time scales by combining information on mass contributions from the large ice masses and terrestrial water storage, glacial rebound, land subsidence, tidal nodes and long-term oscillations in sea level driven by thermal expansion and ocean dynamics. Temporal and spatial variations of local and regional sea level rise are subject to uncertainty, and this results in residuals in the reconstruction of sea level fluctuations. For the North Sea, a slow sea level increase is attributed to ice mass loss since the late ‘80s, while large decadal oscillations due to thermal expansion are superimposed onto a long-term positive trend.

¹⁶ Kang, S. K., J. Y. Cherniawsky, M. G. G. Foreman, H. S. Min, C.-H. Kim, and H.-W. Kang (2005), Patterns of recent sealevel rise in the East/Japan Sea from satellite altimetry and in situ data, *J. Geophys. Res.*, 110, C07002, doi:10.1029/2004JC002565.

¹⁷ Frederikse R., R.Riva M. Kleinherenbrink Y. Wada M. van den Broeke and B. Marzeion (2016): Closing the sea level budget on a regional scale: Trends and variability on the Northwestern European continental shelf; *GRL*, <https://doi.org/10.1002/2016GL070750>

Table 1: An overview of the different drivers of sea level rise.

<u>Physical process</u>	<u>Spatial scale</u>	<u>Temporal scale</u>
Glacier and ice sheet melt	Global/Regional	Decades/Centuries
Thermal expansion of the sea	Local/Global	Years/Decades
Land subsidence and glacial rebound	Local/Regional	Decades/Centuries
Groundwater storage	Global	Years
Hydrological cycle	Regional	Weeks/Months
Gravitational attraction	Global/Regional	Weeks
Storm	Local/Regional	Days
Wind	Local/Regional	Hours/Days
Tides	Regional	Hours/Days/Years
Currents and ocean circulations	Regional/Global	Unknown

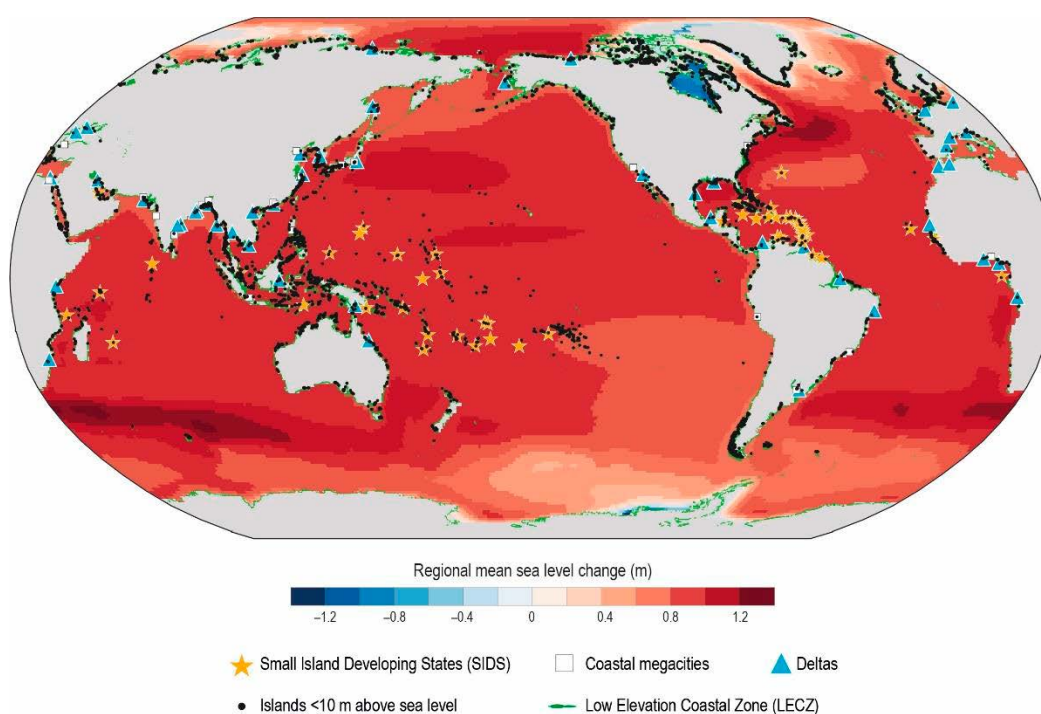


Figure 3: Spatial distribution of projected sea level changes (2081–2100) for climate projections following Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5. Courtesy to IPCC-SROCC Figure CB 9.1¹⁸.

¹⁸ https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/cross-chapter-box-9-integrative-cross-chapter-box-on-low-lying-islands-and-coasts/introduction/ipcc-srocc-ccb_9_1/

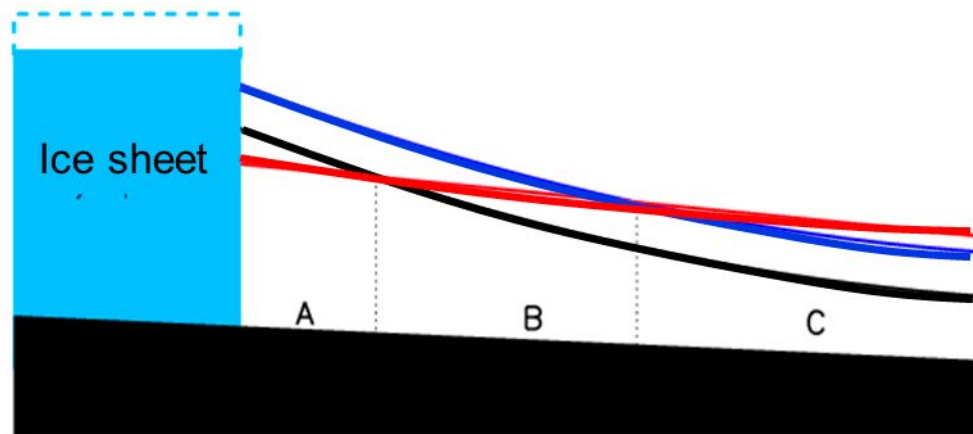


Figure 4: Idealized illustration of the effects of ice sheet mass loss on sea level. A background sea surface is tilted towards a large ice mass (black line). Mass loss from land-based ice will lead to an elevation of the sea surface (blue line). The change in the gravity field nearby the ice mass reduces the nearby gravitational pull on ocean water, compensated by a redistribution of ocean water to remote regions (red line). In section A the ocean surface will reduce relative to the background level in response to ice mass loss; in section B the surface height will increase but lower than for a uniform redistribution of water; in section C the surface height will increase more than based on uniform redistribution. For Greenland the transition between A and B is approximately 2200 km from the ice sheet, and the transition between B and C approximately 6700 km. For Greenland the Netherlands is located in zone B, for Antarctica it is in zone C. Courtesy: KNMI¹⁹

4.2 Sea level observations: tide gauges and satellite measurements

Tide gauges monitor sea level around the world during the past centuries²⁰. The tide gauge database²¹ comprises a relatively long dataset of sea level, predominantly located close to large infrastructures at the coast, such as harbors and sluices. The spatial preference for locations with large infrastructures does not represent sea level in the open seas. Satellite altimetry has provided sea level measurements at open sea over the last decades. For further reading on measurement techniques, corrections and filtering of observations see the Zeespiegelmonitor¹³, the recent online brochure²² and the FAQ.

4.3 Sea level rise projections

Many global and regional sea level projections are presented in the literature, for different purposes. Here we focus on projections of global mean sea level for the upcoming centuries as assessed by IPCC, and the local interpretations for the Dutch coast.

The IPCC reports assess global mean sea level rise projections conditioned on different greenhouse gas emission scenarios (representative concentration pathways; RCPs). For each RCP, a likelihood range for sea level rise is given. This range expresses the projection uncertainty resulting from limited understanding of governing process, incomplete observational coverage, internal climate variability and use of imperfect models. Particularly ice mass loss contributes strongly to the large uncertainty. Also, complex interactions between ocean circulation, heat uptake, fresh water supply and surge impacts of strong winds give rise to uncertainty.

¹⁹ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/high-end-climate-change-scenarios-for-flood-protection-of-the-netherlands> Figure 2

²⁰ Tide gauge observations in Amsterdam go back until around 1700

²¹ <https://www.psmsl.org>

²² <https://magazines.rijksoverheid.nl/knmi/knmispecials/2019/03/nu-en-in-de-toekomst>

Sea level rise is relatively slow: warming in the past will continue to influence sea level variations for a long period in the future.

From these global IPCC projections, the KNMI'14 climate change scenarios derive sea level rise projections for the Netherlands²³ for different global warming levels. These form the basis of the sea level rise component of the Delta-scenarios, used by the Dutch Delta Program²⁴, designed for supporting decisions on the design and implementation of climate change adaptation strategies (for example, water safety measures and future spatial planning in relation to the availability of fresh water resources).

²³ <http://www.klimaatsscenarios.nl>

²⁴ <https://english.deltacommissaris.nl/documents/publications/2019/09/17/dp2020-en-printversie>

5 Topics on present day and future sea level rise

5.1 Local sea level rise acceleration in relation to global sea level rise

The acceleration in sea level rise is observed in the open oceans²⁵, while according to a recent Dutch survey¹³ the acceleration is not detected in the North Sea. The difference in the observations of sea level rise acceleration can be explained by the difference in drivers on global and regional scale, and by the statistical detection of acceleration.

A number of factors explain the difference in the (lack of) observed acceleration in the North Sea and global sea level records. We discuss two specific topics: 1) the small contribution of the Greenland ice mass loss in the North Sea area, and 2) the large year-to-year variability of sea level in the North Sea induced by winds, heat exchange and tides.

The small contribution of the Greenland ice sheet to the North Sea is a result of the spatial variability of the effect of gravitational attraction. Since the North Sea is located within the area of gravitational attraction of the Greenland ice sheet (zone B in Figure 4), only 20 to 30 % of the total contribution to sea level rise from Greenland mass loss contributes to North Sea level rise. In contrast, the contribution of Antarctica to the North Sea is 100 to 120% of the global mean sea level rise. Since Greenland has lost more ice than Antarctica in the last decades, the sea level rise acceleration is smaller in the North Sea than in the mean global sea level acceleration (see also Figure 2).

Secondly, the signal of sea level rise acceleration is hard to quantify in the North Sea due to the relatively small sea level rise (in the order of a few mm/year) and the large temporal variability (in the order of 50-100 mm of annual mean sea level fluctuations). The large variation is caused by the regional drivers: wind, tides, warming patterns and storms. These drivers fluctuate strongly, which causes a larger variation in the yearly North Sea observations than in the large global seas. Also, sea level rise varies on a spatial scale. Figure 5 shows observations and linear trendlines for the mean of Dutch coastal stations and 2 individual stations (Harlingen and Delfzijl). Clearly the different locations show different rates of sea level rise, related to local conditions regarding sediment transport, tidal oscillations, and vertical land motion.

In a time series with large variability a trend needs to be relatively strong before being detected with statistical significance. Different trend analysis methods exist with varying characteristics and (subjective) assumptions. For example, the Belgian environmental agency²⁶ analyses sea level rise from 1951 onwards and concluded that sea level rise acceleration since the early '90s is present in the North Sea. TU Delft has posted a blog reporting on a statistical analysis of the Dutch sea level data, concluding that it is likely that since 1993 an acceleration is present²⁷. In contrast, the Zeespiegelmonitor¹³ used a generalized linear model using a longer data record 1890 – 2017, and concluded that over this period no sea level rise acceleration is present in the North Sea. Applying a linear trend analysis to the Belgian data sample results in similar coefficients of determination as a non-linear method (Figure 5). This similarity in coefficients does not allow a robust statement on the difference in trends.

²⁵ www.ipcc.ch/srocc

²⁶ <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/zeeklimaat/zeeniveau>

²⁷ https://flowsplatform.nl/#/monitoring-for-timely-adaptation-to-sea-level-rise--the-likelihood-of-an-acceleration-based-on-tide-gauge-data-1581422350835____566____

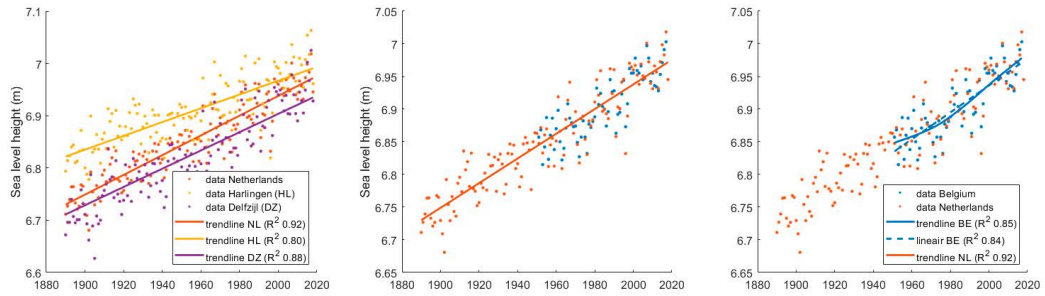


Figure 5: Left panel: observations and linear trends for the mean of the Dutch stations and 2 selected gauge stations (Harlingen and Delfzijl). Middle and Right panel: Different trend lines through sea level observations obtained from Belgian and Dutch surveys.

5.2 Observations in relation to climate change scenarios

Since roughly the '80s of the 20th century comprehensive climate change scenarios are being constructed to assist societal decisions on climate mitigation and adaptation, including robustness checks on large scale infrastructure, spatial planning and safety standards. The observational records increasingly allow detection of features and implications of climate change, and can be compared to the early climate scenarios. Various studies showed that earlier sea level rise scenarios do not match with historic sea level rise observations. Rahmstorf et al (2012)²⁸ concluded that observed global mean sea level rise exceeds earlier global climate projections. For the local Dutch scale, the Zeespiegelmonitor 2019 stated that the KNMI'14 sea level scenarios overestimate the observed sea level rise coast for the recent decades¹³. Here we give an overview of the background of the connection between observations and scenarios for the Dutch coast.

Climate change scenarios are generally developed to support decisions at time scales exceeding a number of decades from now, and their construction is tailored to these applications. For near-term decision taking, observational analyses and extrapolations can be useful to support adjustment of current management practices. For sea level rise, nourishment of sandy coasts is typically adjusted by inspection and extrapolation of historic observations. Long term planning of coastal defense strategies is typically informed using climate projections and scenarios derived from these.

A direct comparison of observations and scenarios is not straightforward. Temporal variability of regional sea level is affected by fluctuating wind, variability in ocean heat uptake, storms and tides. The variability of these processes do not contribute to long-term sea level rise, and therefore are not accounted for in the KNMI sea level scenarios. The observational record can be considered as one realization of possible evolutions of the state of the climate system, governed by modes of variability that are not represented similarly in the scenarios. Therefore, a recorded difference between observations and scenarios in a given time window is not necessarily indicative for inconsistency.

The drivers of regional sea level rise in the KNMI sea level scenarios, such as spatial variability of heat uptake and ocean dynamics are derived from future climate projections of temperature and the hydrological cycle (precipitation and evapotranspiration). Short term fluctuations caused by e.g. storms are generally not included in sea level rise scenarios as they don't contribute to the long-term sea level rise. Relatively slow oscillations at decadal time scales can result from e.g. varying extent or amplitude of large eddy flows in the ocean, leading to local variability. In

²⁸ Rahmstorf, S., Foster, G., and A. Cazenave (2012), Comparing climate projections to observations up to 2011, Environ. Res. Lett., 7, 044035, doi:10.1088/1748-9326/7/4/044035.

scenarios of local sea level this internal variability can be represented as uncertainty bands, but cannot be used to project sea level rise for a given short episode. The KNMI'14 scenarios do represent uncertainty in the degree to which global climate models calculate the impact of a given global warming level on regional sea level. Uncertain regional drivers influencing the North Sea are, for instance, regional ocean circulation, gravitational attraction of the ice masses, and thermal expansion in shallow seas (see section 2.1). For the first decades of the scenarios, this uncertainty range is approximately 1.4 cm and increases with time, where the combined contribution of for instance ice mass processes and thermal expansion increase.

Also some local factors play a role, that need to be accounted for specifically in the scenarios. When scenarios are expressed as absolute sea level rise relative to a (global mean) reference level, local vertical land motion can contribute to relative sea level. Mean land subsidence was 0.45 mm/year in the Netherlands over 1917 to 2017²⁹. In addition the choice of a reference level is of importance. For instance, the reference for the KNMI'14 scenarios is the center of the 1980-2010 interval (1995), and at this point in time the mean sea level was 3 cm above NAP. To improve the match between the scenarios and observations the reference level of the KNMI scenarios was increased by 2 cm and an increase of 0.45 mm/year subsidence was applied to the scenarios in the Zeespiegelmonitor (Figure 6). An extra panel shows a display of the KNMI scenario results including the corrections applied in the Zeespiegelmonitor for the entire 21st century. It leads to an upward shift of the original scenarios, but the linear trendline and time filtered observations are still within the uncertainty range of the scenarios in the overlapping period. A considerable acceleration of sea level rise in the future is in line with the projected sea level rise levels for the end of the 21st century in the high scenario.

²⁹ Hijma, M. and H. Kooi (2018): Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2). Tech. Rep. 11202190-001-ZKS-0001, Deltares.

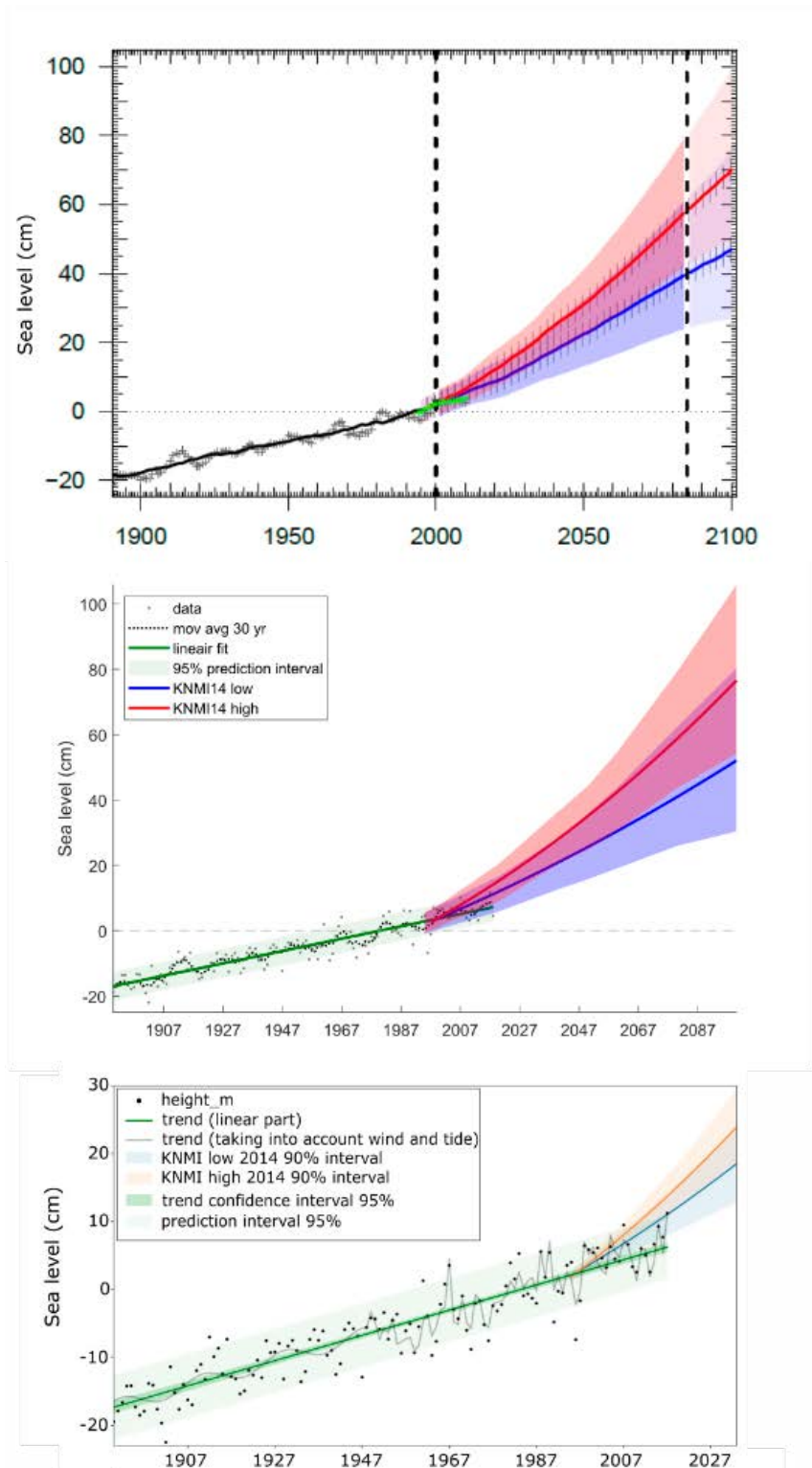


Figure 6: Upper panel: display of scenarios and observations in De Vries et al (2014)³⁰. Lower panel: presentation of KNMI sea level projections and historic observations in the Zeespiegelmonitor¹³. In the upper panel scenarios have a reference level of 0 cm in 1995 and don't account for land subsidence. Historic observations are filtered with a 5-year moving average. The middle panel shows the results from the upper panel after application of the reference level and land subsidence correction similar to the Zeespiegelmonitor.

³⁰ De Vries, H., Katsman, C., and S. Drifhout (2014), Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways, Environ. Res. Lett., 9, 115007, doi:10.1088/1748-9326/7/4/044035

5.3 High-end scenarios in relation to a “likely” range of projections

For many processes contributing to sea level rise (see section 1.3) a likelihood range applies. Contributions from ice sheet mass loss encompass a very wide range of possible levels (from <1 mm to multiple cm per year, depending on time period and global warming level), while the effect of glacier rebound is less uncertain. The IPCC reports make assessments of the probability range of the individual contributions. A probability range within 66% of the total probability distribution is indicated as “likely” by IPCC conventions.

Outside this “likely” range low probability scenarios with a potentially high impact are constructed. Their probability is difficult to assess, but they may be very relevant for long-term planning of climate adaptation strategies and their potential impact on relatively short-term measures. A major contributor to a *low likelihood – high impact scenario* is the very uncertain role of the limited stability of the Antarctic ice sheet. So-called “high-end scenarios” are constructed by assuming processes leading to rapid ice mass loss to take place, and these are discussed and assessed in the Assessment Reports and SROCC. When the underlying assumptions of the high-end scenarios are considered physically plausible, they can function as a “narrative” (or “storyline”) to explore possible policies. Haasnoot et al. (2018)³¹ and Ranger et al. (2013)³² give examples of the relevance of high-end scenarios for adaptation policy making. Haasnoot et al. (2018) assume a strong global warming, a strong destabilization of ice sheets in Antarctica, and a strong acceleration of the land ice mass loss from Greenland and Antarctica due to unstable ice cliffs and erosion of the ice sheet located on land.

The high-end scenarios are actively discussed in the scientific literature. From this discussion a statement on the likelihood of these scenarios cannot be derived. A summary of this discussion can be found in the recent IPCC report SROCC²⁵.

³¹ Haasnoot, M., Van 't Klooster, S., and J. van Alphen (2018), Designing a monitoring system to detect signals to adapt to uncertain climate change, *Global Environmental Change*, 52, 273-285, doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.08.003

³² Ranger, N., Reeder, T., and J. Lowe (2013), Addressing ‘deep’ uncertainty over long-term climate in major infrastructure projects: four innovations of the Thames Estuary 2100 Project, *EURO J. Decis. Process.*, 1, 233-262, doi:10.1007/s40070-013-0014-5.

6 Expected discussions in the coming decade

It can be anticipated that also in the upcoming decades scientific insights and societal debates about sea level rise will continue. The high (and in fact, increasing; see below) uncertainty and its potentially high societal impact will continue to trigger societal discussions.

The sea level rise is a phenomenon of long timescales. Past increases in global temperature will continue to have impact on sea level rise for centuries, even when warming would stop now, since it is predominately caused by relatively slow thermal expansion and mass loss from ice sheets. The different projections for sea level rise do not strongly diverge until the middle of the 21st century, in spite of using different assumptions on greenhouse gas emissions. Assessments on likelihood and impacts of future sea level rise will continue to rely greatly on physical insights and model projections rather than direct observational evidence.

In addition, the large uncertainty involved with sea level rise is not expected to reduce soon, despite (or because of) scientific advances revealing new insights, potential risks and leading to wider “likely” ranges of future sea level rise³³. New generation general climate models are being built, that may include additional processes and feedbacks contributing to changed sea level responses to global warming. The latest IPCC report adjusted the range of likely sea level rise scenarios relative to the 5th assessment report. On the other hand, improved physical detail and model representation can contribute to elimination of implausible scenarios, better detection of early warning signals, and larger confidence in the sea level projection ranges. It will take a couple of decades before these scientific advances will be clearly noticeable.

³³ Bamber, J.L., Oppenheimer, M., Kopp, R.E., Aspinall, W.P. and R.M. Cooke (2019), Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment, PNAS, 116, 11195-11200, doi:10.1073/pnas.1817205116.

We do not observe acceleration in the North Sea level rise measurements. What does this say about the future?

The fact that no acceleration is visible in the North Sea measurements, does not imply it will not occur in the future. All projections indicate that sea level rise will accelerate in the future, especially after 2050. Hence, the current Delta scenarios, based on the KNMI'14 scenarios, include this acceleration. Although the current contribution to the rising sea level of melting ice from Greenland and Antarctica is small, it is expected that these contributions will increase over the course of the century under the influence of rising temperatures. In some scenarios for the Antarctic ice sheet, the acceleration will exceed the level that is currently considered in the Delta scenarios.

How large are the uncertainties for the future?

There are several uncertainties affecting sea level rise estimates, namely: a) the projected global warming, which in turn is partly dependent on greenhouse gas emissions, b) the effects of the rise in temperature on the expansion of the ocean, and c) the response of the Greenland and Antarctic ice sheets to rising (ocean) temperatures. We therefore use different projections to display a bandwidth of possible future sea level rise scenarios.

How are sea level scenarios made?

The expectations for the distant future are based on 1) a combination of observations and reconstructions, 2) knowledge about processes that contribute to sea level, and 3) the outcomes of computer models. All research is regularly assessed by the IPCC in its periodic "Assessment Reports". The current Delta scenarios are based on the IPCC Fifth Assessment report. According to those projections, a sea level rise of more than 1 meter in 2100 has a small chance. KNMI will release new climate scenarios and sea level projections in 2023, which in turn will largely be based on the most recent IPCC reports and climate models.

What should we do (which actions to take)?

Not only a higher sea level influences the water management strategy of the Netherlands, but also the pace at which this sea level rise is taking place is important. Taking measures requires a long preparation and implementation time, and with very rapid sea level rise the available time is limited. The consequences will mainly become apparent after 2050. However, interventions to be prepared for this may be necessary long before 2050. In order to respond promptly and with the right measures, it is important to investigate further the consequences, available measures and warning signals.

Are sea levels rising the same all over the world, as if we're filling a giant bathtub?

No. Sea level rise is uneven, for instance by spatially varying impacts of ocean dynamics, wind and tides, land subsidence (or even uplift of land in previously glaciated areas) and the Earth's uneven gravity field.

How does El Niño fit into the sea-level rise picture?

Over periods of 2-8 years, after removing the overall trend of about 3 millimeters per year, the globally averaged sea-level rise closely follows the waxing and waning of El Niño. The main reason for this close match is that El Niño shifts rainfall from land to ocean, raising sea level temporarily. Its opposing phase, La Niña, shifts rainfall to land, causing sea level to drop.

How much do human activities contribute to sea level rise?

Many lines of evidence demonstrate that human activities, especially greenhouse gas emissions from fossil fuel combustion, are primarily responsible for the climate changes observed in the industrial era, especially over the last six decades. Human-induced greenhouse gas emissions are the only factors that can account for the observed warming over the last century that is driving the observed sea level rise; there are no credible alternative human or natural explanations supported by the observational evidence. Previous estimates show that human activities are responsible for about 70 percent of the observed sea level rise since 1970, with the percentage approaching 100 percent for present day contributions.



waddenacademie