

Datum 1 februari 2021	Ons kenmerk 11205238-000-DSC-0002	Aantal pagina's 1 van 11
Contactpersoon Willem Stolte	Doorkiesnummer +31(0)88 335 8598	E-mail Willem.Stolte@deltares.nl

Onderwerp
Methode voor visualisatie van tijdreeksen en scenario's voor zeespiegelstijging

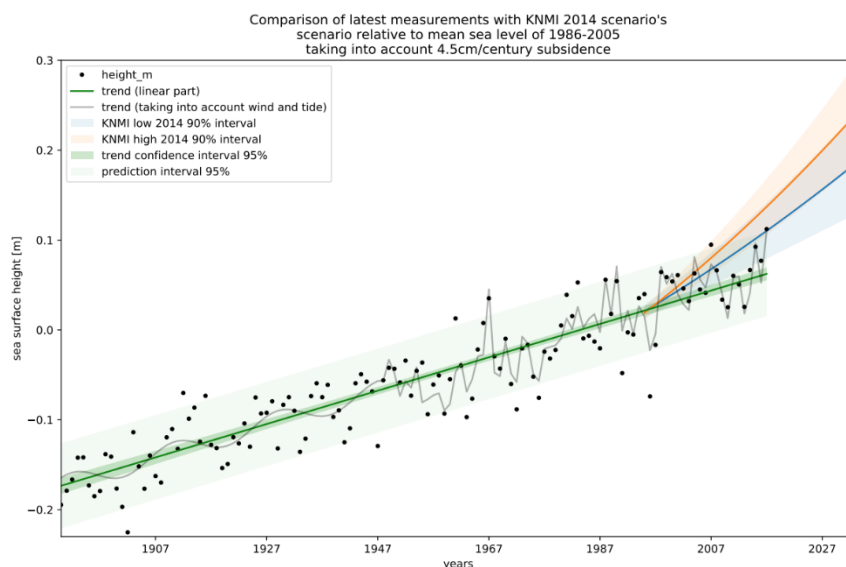
Methode voor visualisatie van tijdreeksen en scenario's voor zeespiegelstijging – concept versie voor discussie

Fedor Baart (Deltares) & Dewi le Bars (KNMI) & Bart van den Hurk (Deltares)

1 Inleiding

Dit document geeft invulling aan het voorstel voor een nieuwe gezamenlijke presentatie van de KNMI klimaatscenario's van zeespiegelstijging en de metingen langs de Nederlandse kust (van den Hurk et al., 2019). In dat memo werd aanbevolen om Deltares en KNMI een nieuwe variant te laten maken van deze gezamenlijke presentatie, zodat beide instituten dezelfde figuur gebruiken.

Het memo van Van den Hurk et al (2019) volgde op de publieke discussie over de verschillen tussen zeespiegelscenario's en gemeten zeespiegel. Dit verschil werd in de Zeespiegelmonitor (Baart et al., 2018) en het bijbehorende nieuwsbericht aangestipt met behulp van Figuur 1. Deze figuur werd breed gedeeld in publieke en sociale media, vaak in de context van discussies over de accuraatheid van de klimaatscenario's.



Figuur 1: Zeespiegelstijging metingen versus scenario's zoals weergegeven in de Zeespiegelmonitor 2018. Het betrouwbaarheidsinterval van de waarnemingen wordt weergegeven door de (smalle) donkere bandbreedte rond de trendlijn, terwijl het predictie-interval wordt aangegeven door de lichtgroene zone. De onzekerheidsmarges van de scenario's is een betrouwbaarheidsinterval voor de schatting van de gemiddelde zeespiegelstijging door de gebruikte verzameling modelprojecties (zie tekst).

Dit memo beschrijft eerst een set afwegingen bij het maken van een gecombineerde presentatie van metingen en scenario's. Op basis van deze afwegingen is een prototype van deze figuur opgesteld.

1.1 Afwegingen bij het maken van een gezamenlijk presentatie van metingen en scenario's.

Niet alleen in de publieke discussie, maar ook voor het kustbeleid (zie bijvoorbeeld Baart et al., 2014) is een optimale aansluiting en gezamenlijke presentatie van deze gegevens wenselijk. Ten behoeve van de consistentie en vergelijkbaarheid van de gegevens, en afhankelijk van het gebruik van de resultaten, moeten verschillende keuzes gemaakt worden:

- **Bodemdaling en getij:** Worden bodemdaling en langjarig getij wel of niet meegenomen? In Figuur 1 is bodemdaling toegevoegd aan de scenario-gegevens, omdat de oorspronkelijke scenario's (Vries et al., 2014) geen rekening houden met bodemdaling van de kust.
- **Locatie:** Over welk gebied wordt zeespiegel gemiddeld? De Nederlandse kust? De kuststrook? De Noordzee? Met of zonder Waddenzee? De metingen in Figuur 1 zijn gemiddeld over de zes hoofdstations (Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl), die uniform verdeeld liggen langs de Nederlandse kust. De scenario's zijn eveneens gemaakt voor de Nederlandse kust.
- **Periode:** Zeespiegelstijging heeft altijd betrekking op een tijdsperiode. De gegevens van de getijstations worden weergegeven vanaf 1890 tot heden. De KNMI'14 klimaatscenario's zijn opgesteld voor de 21^e eeuw. Ze geven een verschil weer ten opzichte van de referentieperiode 1986-2005. In Figuur 1 is ingezoomd op de nabije toekomst.
- **Variantie:** De zeespiegel varieert, van dag tot dag, van seizoen tot seizoen en ook over meerdere jaren. De scenario's laten niet alle bronnen van variantie zien, bijvoorbeeld variatie veroorzaakt door wind of getij. De waarnemingen zijn gemiddeld per jaar, dus variaties door seizoen en het dagelijks en maandelijks getij zijn uitgemiddeld. De metingen laten de jaar tot jaar variatie wel zien.
- **Bandbreedte:** Er zijn verschillende varianten van bandbreedtes rond trendlijnen of projecties. In Figuur 1 zijn betrouwbaarheidsintervallen gebruikt om de betrouwbaarheid van een trendlijn weer te geven, en predictie-intervallen om de variatie van individuele waarnemingen te tonen.
- **Verticale referentie:** Uitspraken over de zeespiegelstand worden gedaan ten opzichte van een verticaal referentiepunt. In Figuur 1 zijn zowel de scenario's als de metingen getoond ten opzichte van het huidige NAP.
- **Gefitte curve:** Een statistische methode is gebruikt om de onderliggende trend te tonen. In Figuur 1 wordt voor de metingen een lineaire regressie getoond (groene en zwarte lijn) en daaromheen een betrouwbaarheidsinterval (nauwe band, betrouwbaarheid van de trend en hoogte) en een predictie-interval (brede groene band, maat voor de variatie van de jaargemiddelden). Door de scenario's is een polynome curve gefit, zowel door het 5-95% betrouwbaarheidsinterval als door de mediaan.

2 Oorspronkelijke weergave van metingen en scenario's

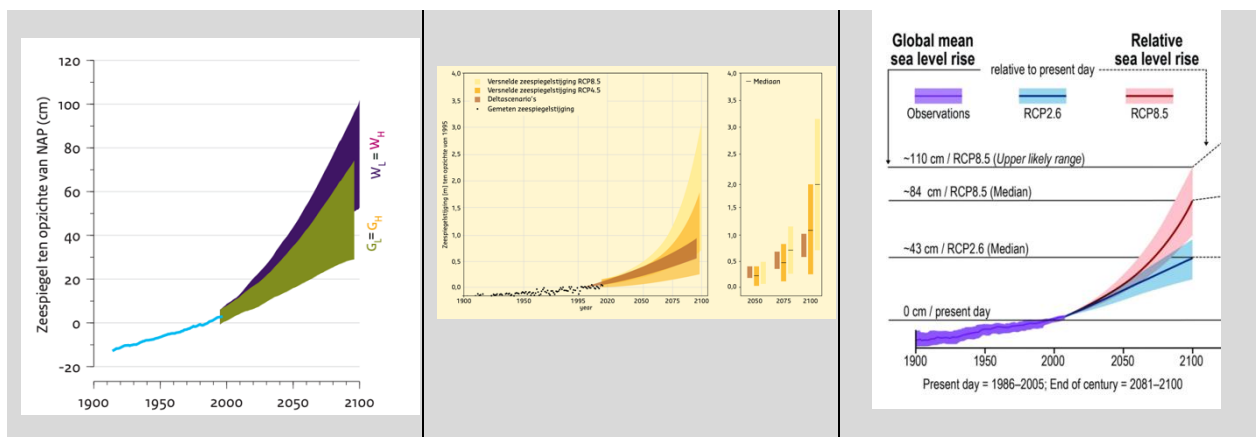
De zeespiegel wordt elke minuut gemeten. Op deze korte tijdschaal is de variatie in de zeespiegel (1.5 m getij-amplitude, 2 à 3 m variaties door stormopzet) veel groter dan de trend in de zeespiegelstijging. Daarom wordt doorgaans de jaargemiddelde zeespiegelstand gepresenteerd, waarin ook variaties tussen seizoenen en de dagelijkse en maandelijks getijcyclus uitgemiddeld zijn. De nauwkeurigheid (of representativiteit) van de (gefilterde) gegevens kan worden weergegeven door een betrouwbaarheidsinterval (de schatting van de

gemiddelde zeespiegelstijging) en een predictie-interval (de spreiding van waarnemingen daaromheen).

De KNMI'14 zeespiegelscenario's worden getoond als een curve die is gefit tussen een aantal aangenomen waarden voor de wereldwijde temperatuurstijging die voor bepaalde tijdvakken zijn opgesteld (zie ook Figuur 2 hieronder). Het getoonde onzekerheidsinterval kan worden geïnterpreteerd als een betrouwbaarheidsinterval, waarbinnen een grote fractie (5-95%) van alle onderliggende modelruns worden omvat door het interval. De bandbreedte van dit interval wordt vooral bepaald door de onzekerheid waarmee met de gebruikte verzameling modellen de zeespiegelstijging bij een gegeven emissiescenario wordt geschat. Bijdragen van nodaal getij, lokale bodemdaling en stormcondities zijn niet meegenomen in de oorspronkelijke KNMI'14 scenario's.

3 Voorbeelden van metingen versus scenario figuren

De eerdergenoemde keuzes werken door in de uiteindelijke vorm van een gecombineerde presentatie van metingen en scenario's. Figuur 2 illustreert diverse weergaven.



Figuur 2: Voorbeelden van gecombineerde weergaven van metingen en scenario's van zeespiegelstijging.

Links: KNMI'14 brochure. Hierin zijn zowel de gemeten als de scenario's van de zeespiegelstijging gefilterd met een lopend 30 jaar gemiddelde. De waarnemingen stoppen bij 1996. De mediaan van de scenario's is niet weergegeven. De zeespiegel wordt weergegeven ten opzichte van NAP. **Midden:** Deltaprogramma bijlage B (Haasnoot et al., 2018). De metingen zijn hier als individuele punten getoond, zonder ze met elkaar te verbinden. De scenario's zijn in het linker assenstelsel getoond zonder mediaan. In het rechter assenstelsel wordt de mediaan wel getoond. De zeespiegelstijging wordt weergegeven ten opzichte van de zeespiegel in 1995. **Rechts:** IPCC SROCC (Oppenheimer, 2019). Hier worden de observaties getoond met een bandbreedte, afgeleid uit reconstructies op basis van getijdestations. De intervallen van de scenario's worden getoond met de mediaan. Het referentieniveau is "present day sea-level (1986-2005)".

Deze vrijheid in de keuzes van de presentatievorm introduceert een zekere mate van subjectiviteit. Het gebruik van een lopend 30-jarig gemiddelde bij de KNMI 2014 scenario's legt de nadruk op processen die de zeespiegelstijging op langere termijn beïnvloeden, en deze aanname bepaalt de vorm van de figuur. Deze filtering onderdrukt uiteraard de jaar tot jaar variatie (veroorzaakt door bijvoorbeeld stormen en nodaal getij) en maakt weergave van de laatste 15 jaar van de 21^e eeuw onmogelijk.

Naast de lijst van bewuste keuzes zijn er ook esthetische kenmerken (kleur, ruimtegebruik) die bewust of onbewust de interpretatie van de figuur kunnen sturen. Zo maakt de gekozen verticale as in de figuur uit Bijlage B van het Deltaprogramma (Figuur 2, midden panel) de variatie in het bereik van de metingen niet goed zichtbaar.

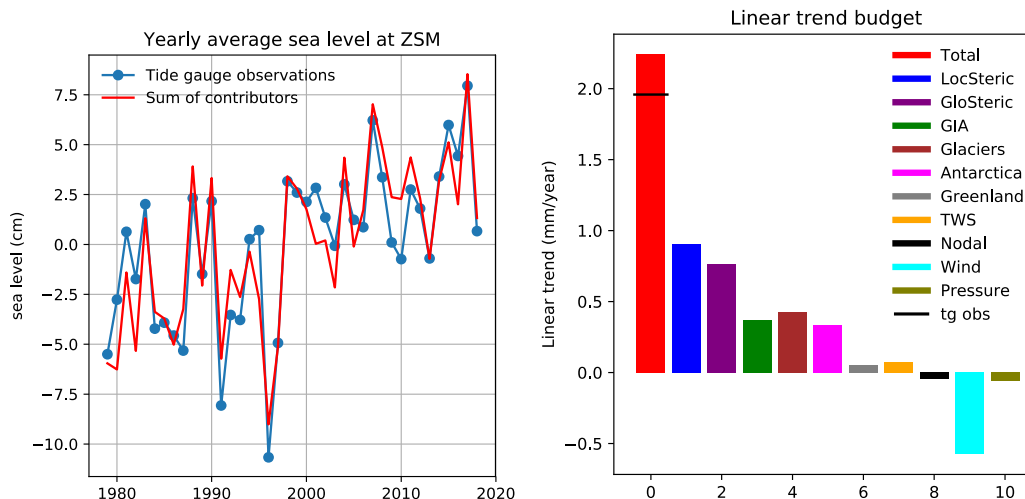
4 Doelstelling van deze studie

Het is wenselijk om een gecombineerde weergave van waarnemingen en scenario's te maken die eenduidige interpretatie van deze data geeft die tegemoet komt aan de verschillen en overeenkomsten van kenmerken en doelstellingen van metingen en scenario's. Deze gecombineerde weergave maakt een evaluatie van eerder afgegeven scenario's mogelijk, draagt bij aan het inzicht over de oorzaken van zeespiegelvariaties op verschillende tijdschalen, en faciliteert de analyse van een flexibele tijdsperiode in de buurt van de overgang tussen de metingen en toekomstige scenario's die voor sommige beleidsvraagstukken van belang is.

Voor deze gecombineerde weergave is voorzien in een iteratief afstemmingsproces tussen wetenschappers en gebruikers van de visualisatie. Het prototype wat in deze studie is opgesteld is een bijdrage aan dit afstemmingsproces.

5 Reconstructie van zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust

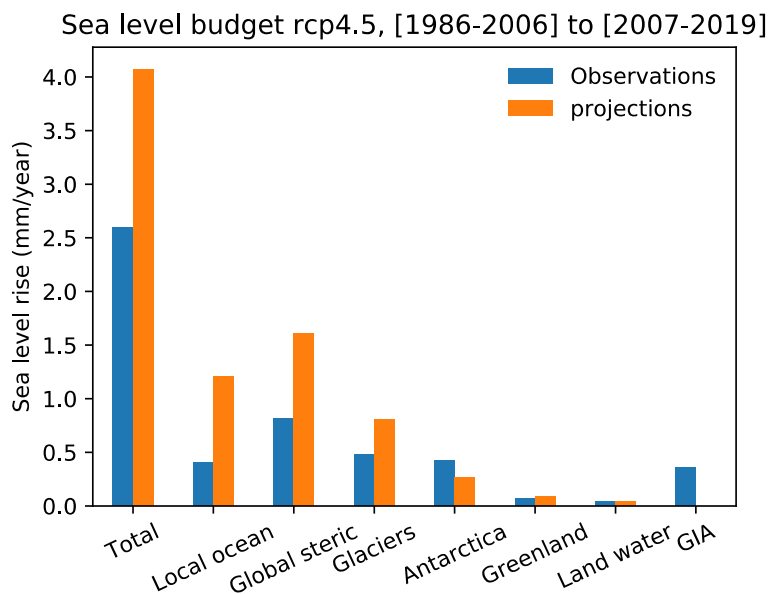
Een belangrijke motivatie voor de gecombineerde figuur is de mogelijkheid om de bijdrage van individuele (tijdsafhankelijke) processen aan regionale zeespiegelstijging te herkennen en kwantificeren (zie het overzicht in het IPCC AR5 rapport; Stocker et al., 2013). Het KNMI zeespiegelscenario-team werkt momenteel aan een reconstructie van processen die bijdragen aan de zeespiegeltrend aan de Noordzeekust. Figuur 3 geeft een overzicht van de processen die hier zijn beschouwd.



Figuur 3: Reconstructie van zeespiegeltrend aan de Nederlandse kust. Links de waargenomen en gereconstrueerde trend sinds 1980. Rechts een overzicht van de bijdrage van individuele processen. Bodemdaling is verdisconteerd in de GIA term (Bron: Le Bars and Drijfhout, unpublished)

De reconstructie maakt gebruik van directe en indirecte waarnemingen van massaverlies van grote ijskappen, lokale wind en drukpatronen, en gemodelleerde analyses van warmteopslag in mondiale en regionale oceanen en verandering van watermassa's op land. Over de afgelopen 40 jaar wordt de trend van ca 2 mm/jaar vooral bepaald door sterische zeespiegelstijging (als gevolg van warmte-opname in mondiale en regionale oceanen), en in mindere mate door bewegingen in de aardkorst en ijs- en watermassa's. Verschuivingen van regionale windpatronen hebben een negatieve bijdrage van ca 0.5 mm/jaar aan de trend geleverd. Deze windvariaties zijn zeer waarschijnlijk het gevolg van natuurlijke fluctuaties in het klimaatsysteem en niet direct toe te schrijven aan mondiale opwarming¹. De zeespiegelscenario's die KNMI in 2023 zal publiceren zullen worden opgesteld aan de hand van een vergelijkbare reconstructie. Daarbij wordt gebruik gemaakt van klimaatmodelprojecties, zowel voor de (toekomstige) bijdrage van ijskappen als de regionale effecten van warmte-opname en atmosferische circulatie. Een verificatie van de CMIP5 modelprojecties die ook voor KNMI'14 zijn gebruikt is weergegeven in Figuur 4. De trendanalyse is hierbij uitgevoerd door vergelijking tussen twee tijdsperiodes in plaats van een regressie over een tijdsinterval, waardoor absolute trendwaarden afwijken van resultaten in Figuur 3.

¹ Binnenkort zal hierover een stage-onderzoek bij KNMI plaatsvinden



Figuur 4: Reconstructie van zeespiegelrend aan de Nederlandse kust met behulp van rcp4.5 projecties uit CMIP5. De reconstructie toont diverse procesbijdragen uit waarnemingen en modelsimulaties. Een vergelijkbare analyse is uitgevoerd voor de rcp8.5 projecties (niet weergegeven) (Bron: Le Bars and Drijfhout, unpublished)

De modelsimulaties laten een lokale zeespiegelstijging zien van ca 4 mm/jr, wat duidelijk groter is dan de in Figuur 4 getoonde waargenomen stijging van 2.5 mm/jr. De belangrijkste termen die dit verschil veroorzaken zijn de bijdragen van lokale effecten (sterische zeespiegelstijging, effecten van wind en druk fluctuaties) en van mondiale sterische zeespiegelstijging. De gebruikte methode om de sterische component in de projecties te kwantificeren bevat meer onzekerheid dan de reconstructie uit waarnemingen², maar in de literatuur is een systematische overschatting van warmte-opslag in CMIP5 modellen gedocumenteerd die in lijn is met de hier gepresenteerde resultaten (Slangen et al., 2017). Deze resultaten zullen worden gebruikt om scenario's voor zeespiegelstijging in KNMI'23 te corrigeren.

6 Nieuwe weergave van waarnemingen en scenario's

Een combinatie van processen draagt bij aan zeespiegelvariabiliteit, zowel in de waarnemingen als in de scenario's. Door deze componenten uit te splitsen kan een vergelijking tussen waarnemingen en scenario's in overlappende tijdsvensters inzicht geven in de relatieve bijdrage van deelprocessen aan zeespiegelvariabiliteit, en in de manier waarop die processen in de scenario's zijn verdisconteerd. Zo is de bijdrage van massaverlies van grote ijskappen in de waarnemingen nog relatief beperkt, maar zal die bijdrage in de toekomst een rol van betekenis gaan spelen, afhankelijk van het gekozen scenario. Anderzijds hebben gedurende de laatste 40 jaar wind en drukpatronen voor een afremming van de lokale zeespiegelstijging gezorgd, maar de toekomstige bijdrage van deze processen is onvoorspelbaar en draagt dus bij aan de onzekerheid van zeespiegelscenario's.

De methodiek voor de nieuwe zeespiegelscenario's zal afwijken van de procedure van KNMI'14. In de vorige editie zijn de scenario's afgeleid van aangenomen waarden voor de

² Voor een gedetailleerde kwantificering van thermische expansie is het nodig te beschikken over 3-dimensionale velden van oceaantemperatuur en zoutgehalte, en door de grote datavolumes die daarmee gepaard gaan is deze analyse vooralsnog niet uitgevoerd. In plaats daarvan is een indirecte budget-sluitingsprocedure gevolgd

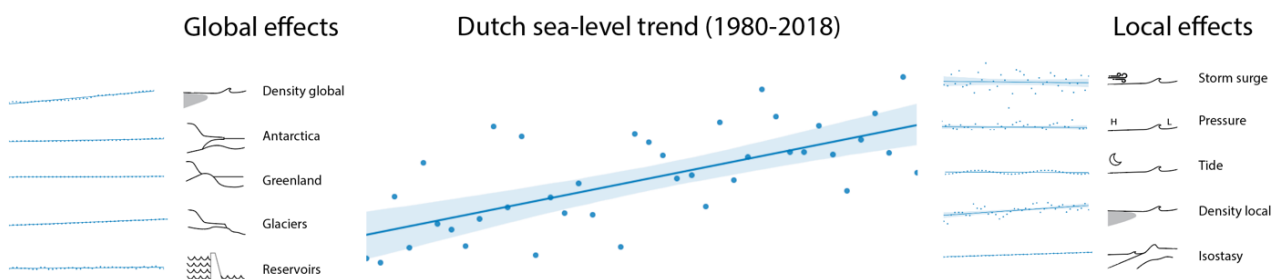
stijging van de wereldgemiddelde temperatuur die ook gebruikt zijn als grondslag voor de overige klimaatvariabelen in de KNMI'14 scenario's. De consistentie met de rest van de klimaatscenario-resultaten ging ten koste van een fysisch consistente weergave van de relatie tussen temperatuurstijging en zeespiegelstijging, die bijdroeg aan de in Figuur 1 getoonde mismatch tussen waargenomen en geprojecteerde trend in de recente geschiedenis. De nieuwe procedure voor KNMI'23 zal gebaseerd zijn op directe output van de CMIP6 klimaatmodellen en reconstructie van de bijdrage van individuele processen waardoor de fysische consistentie van de zeespiegelscenario's sterk wordt verhoogd.

7 Resultaten

7.1 Waarnemingen en analyses van individuele componenten

Zowel van de waarnemingen als van de projecties zijn individuele bijdragen aan zeespiegelstijging in kaart gebracht (zie ook Figuur 3). De decompositie van de waarnemingen in afzonderlijke processen worden in Figuur 5 als tijdseries weergegeven met zogenaamde sparkline figuren (Tuft, 1988), een figuurtype zonder assenstelsel bedoeld om de richting en variatie te laten zien. Deze deelfiguren laten een set van beschikbare databronnen zien die elk een component van de zeespiegelstijging meten. Dit geeft een goed overzicht van welke trends (globaal en lokaal) op dit moment bijdragen aan de variatie en de trend van de zeespiegel langs de Nederlandse kust. Voor de individuele componenten zijn dezelfde databronnen en methode gebruikt als in (Frederikse et al., 2020), met de volgende uitzonderingen: voor lokale dichtheid is gebruik gemaakt van de EN4 dataset (Good et al., 2013); voor het getij is gebruik gemaakt van het geobserveerde nodaal getij. Voor scheve opzet is gebruik gemaakt van GTSM (Muis et al., 2016).

In de afgelopen decennia droegen twee componenten bij aan een toename van de zeespiegel: de dichtheidsveranderingen (uitzetting van water door met name de temperatuurstoename) en het afsmelten van gletsjers. De grootste variatie in de zeespiegel van jaar tot jaar wordt veroorzaakt door variaties in de scheve stormopzet door wind en luchtdrukverschillen. Hierin zit een lichte afname, maar deze is door de grote variatie erg gevoelig voor de gekozen periode.



Figuur 5: Overzicht van sparklines van de verschillende componenten van de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust over de periode 1986-2018 (zie tekst voor toelichting).

7.2 Een prototype van een gecombineerde weergave van metingen en scenario's

Op grond van bovenstaande afwegingen is in Figuur 6 een combinatie-weergave gemaakt, waarbij zowel een weergave tot het eind van de 21^e eeuw als een kortere horizon is weergegeven.

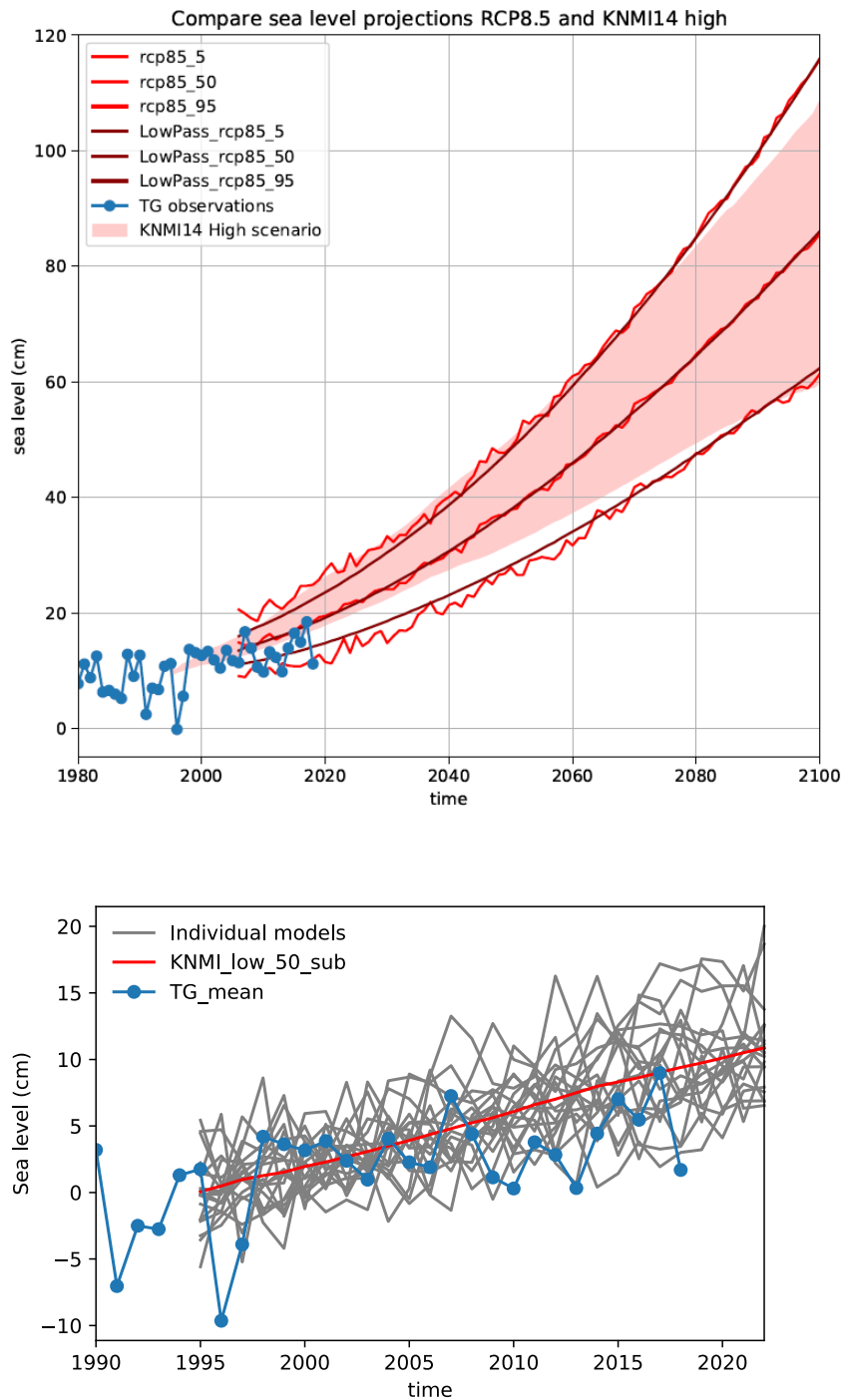
De waarnemingen zijn weergegeven als individuele jaargemiddelde waarden gemiddeld over de 6 referentie-meetstations. De weergave van de zeespiegelscenario's zijn gebaseerd op een herbewerking van de rcp4.5 en rcp8.5 projecties die ook voor de KNMI'14 scenario's zijn gebruikt (Vries et al., 2014). In plaats van een (lineaire) interpolatie tussen puntwaarden voor vaste tijdvakken zijn modeluitkomsten als een lopende tijdreeks gepresenteerd, en zijn naast de mediaan de 5% en 95% percentielwaarde van de modelruns gebruikt. In het panel met de kortere tijdshorizon worden individuele modelmembers weergegeven. Voor referentie zijn ook de KNMI'14 scenario's weergegeven.

Figuur 6 verschilt van Figuur 1. Ten eerste leidt de herbewerking van de scenario-data voor de korte termijn tot een duidelijk ander verloop van de zeespiegelstijging dan in de oorspronkelijke scenario's: de zeespiegelstijging stijgt minder snel, en de overeenkomst met de waarnemingen in het overlappende tijdvak is aanmerkelijk beter. Ten tweede is een aantal kenmerken van de figuur veranderd.

Alle data worden, net als in de Zeespiegelmonitor, weergegeven ten opzichte van NAP. De waarnemingen bevatten een bijdrage van bodemdaling en geven dus relatieve zeespiegelstijging weer. Een bodemdaling van 0.45 mm/jaar is opgeteld bij de scenario's om de (verwachte) invloed van bodemdaling te verdisconteren. Ook de bijdrage van het nodaal getij is opgenomen in de zeespiegel scenario's. De figuur bestrijkt de tijdsperiode van 1980 tot 2100. In een neven-panel wordt ingezoomd op de zeespiegelstijging tussen 1990 en 2020, waarbij de individuele leden van het rcp8.5 ensemble zijn getoond als illustratie van de modelspreiding in jaar-tot-jaar variaties (zie hieronder).

In de scenario's is de getoonde zeespiegelstijging de resultante van de combinatie van bijdragen door massaverlies van ijskappen en gletsjers en de ruimtelijke footprint daarvan, thermische expansie en de daaruit volgende ruimtelijke herverdeling van water door uitwisseling tussen de Atlantische oceaan en de Noordzee, terrestrische bijdragen, en fluctuaties door windopzet. Effecten van variaties in luchtdruk en van de dynamiek van golven zijn niet meegenomen, maar het jaargemiddelde zeeniveau is niet erg gevoelig voor deze effecten. Een betrouwbaarheidsinterval voor de gemiddelde zeespiegelstijging is weergegeven als een 5-95% bandbreedte van een 30-jarig³ lopend gemiddelde van de zeespiegelstijging in elk van de rcp8.5 ensemble leden, om hoogfrequente (jaar-tot-jaar) fluctuaties weg te filteren. Een predictie-interval is weergegeven als de 5-95% bandbreedte van de individuele jaargemiddelde zeeniveau-waarden in het modelensemble.

³ KNMI gaat over op een andere methode voor de berekening van trendlijnen, waarbij een regressie op de wereldgemiddelde temperatuur wordt gebruikt. Dit is minder gevoelig voor de keuze voor de periode waarover een trend berekend wordt; zie <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/standaardmethode-voor-berekening-van-een-trend>



Figuur 6: Prototype van de presentatie van gecombineerde waarnemingen en zeespiegelscenario's, op basis van voorlopige analyses van CMIP5 klimaatprojecties die ook voor de KNMI'14 scenario's zijn gebruikt, getoond voor een hoog (RCP8.5) zeespiegelscenario. Boven de waarnemingen en scenario's voor 1980-2100, met het betrouwbaarheidsinterval voor gemiddelde zeespiegelstijging (donkere getrokken lijnen), en een weergave van individuele waarnemingen en het predictie-interval voor die jaarlijkse waarden in de scenario's. Ter referentie zijn in achtergrondkleuren de KNMI'14 scenario's weergegeven. Onder is ingezoomd op de periode waarin waarnemingen en projecties overlappen. Getoond zijn waarnemingen en individuele modelrealisaties voor het RCP4.5 ensemble. Trendlijnen en betrouwbaarheidsintervallen zijn hier weggelaten.

7.3 Doorontwikkeling naar een interactieve weergave

In Figuur 6 is een voorschot genomen op de gezamenlijke weergave van waarnemingen en scenario's. Om een goede interpretatie te kunnen maken van de bijdrage die individuele componenten aan de totale zeespiegelstijging levert (zie Figuur 3) is een weergave nodig die het mogelijk maakt om deze componenten te verwijderen of toe te voegen aan de uiteindelijke tijdserie. De decompositie van de waarnemingen in individuele bijdragen, getoond in Figuur 5, maakt dit in principe mogelijk: de centrale tijdserie is opgebouwd uit componenten in de sub-panels. Een interactieve applicatie kan worden gemaakt waarin een netto zeespiegelstijging wordt samengesteld uit een selectie van elk van deze componenten. In Figuur 5 kan bijvoorbeeld de bijdrage van windgedreven surge aan de totale zeespiegelstijging worden geëlimineerd; als resultaat zal in het centrale panel de gemiddelde zeespiegelstijging over de getoonde periode (iets) sterker zijn.

Om deze analyse mogelijk te maken voor de gecombineerde waarnemingen en projecties moet ook een decompositie van bijdragen in de projecties worden gemaakt. Dit is werk in uitvoering in het lopende KNMI programma voor de aanstaande zeespiegelscenario's. Om een beeld van de ruimtelijke spreiding van de relatieve bijdragen aan zeespiegelstijging te krijgen kan deze applicatie ook worden toegepast op individuele meetlocaties langs de Nederlandse kust. Ontwerp en uitvoering van deze applicatie zijn onderdeel van vervolgstudies.

8 Conclusie

Het prototype van de gezamenlijke zeespiegel-weergave van waarnemingen en de scenario's, ontwikkeld in samenwerking tussen KNMI en Deltares, maakt het mogelijk een eenduidig beeld te presenteren van de historische en geprojecteerde zeespiegelstijging. Het resultaat is opgesteld na een analyse van de invloed van een aantal (subjectieve) presentatie-keuzes, onder meer de selectie van de verschillende vormen van variabiliteit en een consistente aanpak van waarnemingen en basisinformatie voor de scenario's.

Deze nieuwe visualisatie staat niet los van de nieuwe methodiek waarmee de KNMI'23 zeespiegelscenario's zullen worden opgesteld. Deze methodiek is nog in ontwikkeling, maar zal de sterke koppeling tussen niveaus van mondiale opwarming en resulterende zeespiegelstijging (gebruikt in KNMI'14) vervangen door combinatie van tijdsafhankelijke processen die direct worden afgeleid uit de CMIP6 klimaat- en ijskaprojecties. Hierdoor zal de consistentie tussen waargenomen en geprojecteerde trends in de nabije toekomst aanzienlijk toenemen. Een voorlopige analyse op basis van de CMIP5 klimaatprojecties is opgenomen in dit memo.

Voor een consistente weergave van waarnemingen en projecties is het ook nodig om eenduidigheid aan te brengen in de weergave van diverse vormen van onzekerheid. Zeespiegelfluctuaties worden veroorzaakt door processen met uiteenlopende tijdschalen, en op hun beurt uiteenlopende toepassingsgebieden, mate van voorspelbaarheid, en relevantie voor scenario's. In de gecombineerde presentatie is gekozen om onderscheid te maken tussen onzekerheid in de langjarige trend in de zeespiegel (uitgedrukt in een betrouwbaarheidsinterval voor de lange termijn trendlijn), en een bandbreedte die de fluctuaties van jaargemiddelde zeespiegel weergeeft (een predictie-interval). Voor de weergave van het betrouwbaarheidsinterval voor de scenario's is in deze studie een voorschot genomen op de wijze waarop die in de nieuwe KNMI'23 zeespiegelscenario's zal worden bepaald.

Voor de periode waarin de waarnemingen en CMIP5 projecties elkaar overlappen (1995 – 2020) ligt de trendlijn van de waarnemingen aan de onderkant van de bandbreedte van projecties. Oorzaken hiervoor zijn onder andere de relatief sterke negatieve bijdrage van wind- en drukpatronen (aantal stormen) aan de opgetreden zeespiegelstijging, en mogelijk een systematische fout in de warmte-opslag in oceanen in de klimaatprojecties. De

waarnemingen zijn daarmee niet inconsistent met de projecties, maar deze resultaten geven wel richting aan de ontwikkeling van de volgende generatie zeespiegelscenario's.

9 Referenties

- Baart, F., Leander, R., de Ronde, J., de Vries, H., Vuik, V., & Nicolai, R. (2014). *Zeespiegelmonitor 2014* (Issue 1209426.202).
- Baart, F., Rongen, G., Hijma, M., Kooi, H., De Winter, R., & Nicolai, R. (2018). *Zeespiegelmonitor 2018* (Issues 11202193-000-ZKS-0004). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23924.71044>
- Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L., Adhikari, S., Parkes, D., Humphrey, V. W., Dangendorf, S., Hogarth, P., Zanna, L., Cheng, L., & Wu, Y. H. (2020). The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, *584*(7821), 393–397. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>
- Good, S. A., Martin, M. J., & Rayner, N. A. (2013). EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *118*(12), 6704–6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>
- Haasnoot, M., van 't Klooster, S., & van Alphen, J. (2018). Designing a monitoring system to detect signals to adapt to uncertain climate change. *Global Environmental Change*, *52*, 273–285. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.003>
- Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., & Ward, P. J. (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature Communications*, *7*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/ncomms11969>
- Oppenheimer, M. (2019). *Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities*, in: Pörtner, H.-O. et al. (eds), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Slangen, A. B. A., Meyssignac, B., Agosta, C., Champollion, N., Church, J. A., Fettweis, X., Ligtenberg, S. R. M., Marzeion, B., Melet, A., Palmer, M. D., Richter, K., Roberts, C. D., & Spada, G. (2017). Evaluating model simulations of twentieth-century sea level rise. Part I: Global mean sea level change. *Journal of Climate*, *30*(21), 8539–8563. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0110.1>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*.
- Tufte, E. R. (1988). The visual display of quantitative information. In *IEEE Power Engineering Review* (Vol. 8, Issue 2, p. 20). <https://doi.org/10.1109/MPER.1988.587534>
- van den Hurk, B., Baart, F., Drijfhout, S., le Bars, D., & de Winter, R. (2019). *Constructie consistente weergave waargenomen en geprojecteerde zeespiegelstijging langs Nederlandse kust*.
- Vries, H. De, Katsman, C., & Drijfhout, S. (2014). Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways. *Environmental Research Letters*, *9*(11), 115007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/115007>