



Aan:

Directoraat-Generaal Groningen en Ondergrond
Directie Transitie Diepe Ondergrond
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Bezuidenhoutseweg 73
2594 AC Den Haag

Faculteit Geowetenschappen

Departement Fysische Geografie
Postbus 80115, 3508 TC Utrecht

Bezoekadres

Vening Meinesz A, Princetonlaan 8a
3584 CS Utrecht, Nederland

Website: www.uu.nl

E-mail: [redacted]

Telefoon: [redacted]

Datum 31 januari 2024
Onderwerp Advies beleids- en richtscenario relatieve
zeespiegelstijging Waddenzee 2024-2050

Geachte [redacted]

Naar aanleiding van uw verzoek d.d. 23 augustus 2023 (kenmerk 202308053) is het mij een genoegen om u, namens de expertgroep, hierbij het gevraagde advies aan te bieden met betrekking tot de herziening van het zeespiegelstijgingsscenario voor de Waddenzee voor de periode 2024-2050. Aanleiding van uw verzoek is de publicatie van de Zeespiegelmonitor (d.d. 29 maart 2023) en het advies van Staatstoezicht op de Mijnen (d.d. 6 december 2022) die beide een hogere snelheid van zeespiegelstijging geven dan het huidige scenario. Het huidige scenario is gebaseerd op het advies dat eind 2020 is uitgebracht door de expertgroep en is herbevestigd in mei 2022 met de destijds meest recente inzichten (IPCC-rapport 2021 en KNMI Klimaatsignaal 2021). Daarnaast verzoekt u om een eenduidig antwoord op de zeespiegelstijging op de korte termijn (tot 2029, zie kamerbrief juni 2023 [Herziening gebruiksruimte Waddenzee | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#)).

Het voorliggende advies omvat een stijgingsscenario voor de korte termijn voor de periode 1 januari 2024 – 1 januari 2029 (beleidsscenario) en een aansluitend lange termijn stijgingsscenario voor de periode tot 2050 (richtscenario). In het zeespiegelstijgingsscenario zijn de absolute zeespiegelstijging en de natuurlijke bodemdaling meegenomen. De door menselijke activiteiten veroorzaakte bodemdaling maakt geen onderdeel uit van dit advies.

Dit advies is opgesteld ten behoeve van de gebruiksruimtetoeets voor de komende 5 jaar voor delfstofwinning onder de Waddenzee volgens het 'Hand aan de Kraan' principe.

De expertgroep bestaat uit experts van KNMI, Deltares, NIOZ, TNO-Geologische Dienst Nederland, TU Delft, en Universiteit Utrecht. Daarnaast zijn aanvullend experts geraadpleegd van Staatsbosbeheer, TNO-Geologische Dienst Nederland en Deltares die een belangrijke rol hebben gespeeld bij het opstellen van de 'Hand aan de Kraan' methodiek.



De technische evaluatie (zie bijlage) leidt tot de volgende formulering van het geadviseerde beleidsscenario per 1 januari 2024 en richtscenario per 1 januari 2029 voor de relatieve zeespiegelstijging, inclusief natuurlijke en exclusief antropogene bodemdaling:

Beleidsscenario 1 januari 2024 – 1 januari 2029

Snelheid van relatieve zeespiegelstijging (Z)

$$Z(J) = Z(2010) + (J-2010) * A_1$$

met:

$$Z(2010) = 2,9 \text{ mm/jaar}$$

$$A_1 = 0,05 \text{ mm/jaar}^2$$

De waarden voor $Z(J)$ gelden per 1 januari van het kalenderjaar J .

A_1 representeert de versnelling van de zeespiegelstijging.

In het beleidsscenario neemt de zeespiegelstijgingsnelheid toe van 3,60 [3,10-4,20]¹ mm/jaar in 2024 tot 3,85 [3,35-4,45] mm/jaar in 2029 met een verwachtingswaarde volgens bovenstaande vergelijking.

Dit beleidsscenario valt hoger uit dan in vorige adviezen omdat sinds 2023 overeenstemming is tussen KNMI, de Zeespiegelmonitor en TU Delft dat de zeespiegelstijging versnelt. Voor het eerst is nu een versnellingsterm meegenomen in de extrapolatie.

In het richtscenario neemt de zeespiegelstijgingsnelheid toe van 3,85 [3,35-4,45] mm/jaar in 2029 tot 6,8 [5,0-10,8] mm/jaar in 2050 met een jaarlijkse verwachtingswaarde volgens onderstaande vergelijking.

Richtscenario 1 januari 2029 – 2050

$$Z(J) = Z(2029) + (J-2029) * A_2$$

met:

$$Z(2029) = 3,85 \text{ mm/jaar}$$

$$A_2 = 0,140 \text{ mm/jaar}^2$$

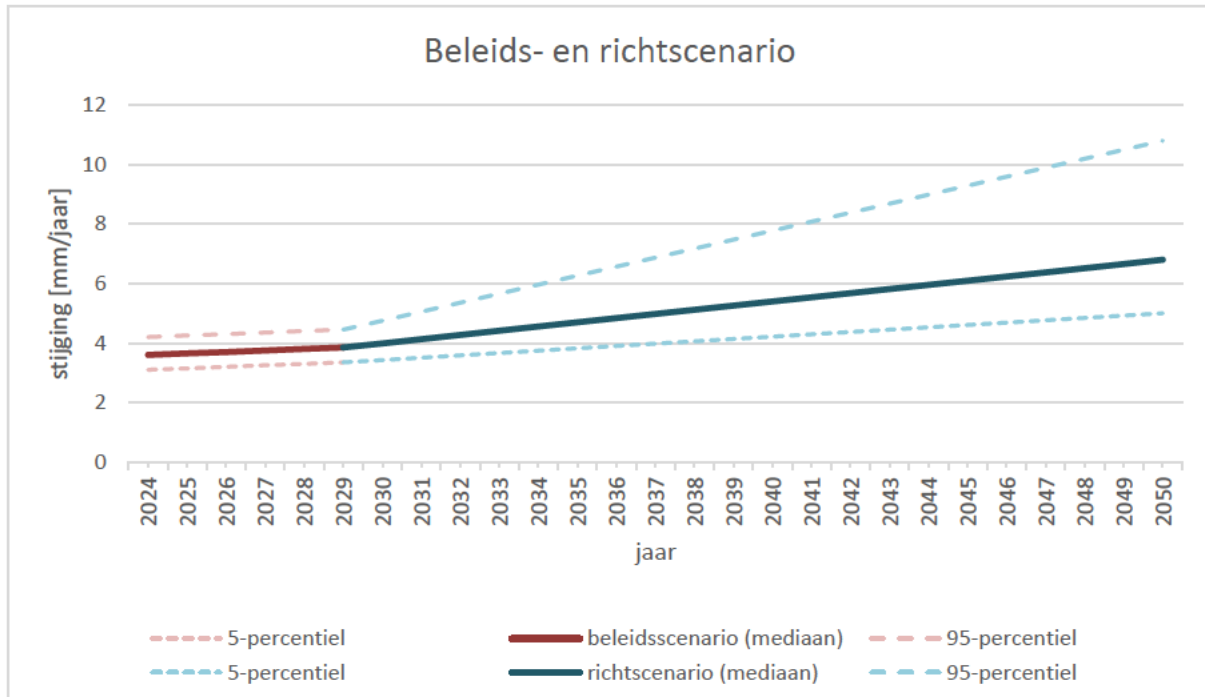
De waarden voor $Z(J)$ gelden per 1 januari van het kalenderjaar J .

A_2 representeert de versnelling van de zeespiegelstijging.

¹ [5 percentiel-95 percentiel]



Het richtscenario sluit aan op het beleidsscenario. Beide scenario's zijn gevisualiseerd in onderstaande figuur.



Aandachtspunten voor de toekomst

Bij dit advies willen we een aantal aandachtspunten meegeven voor de toekomst. Deze aandachtspunten zijn aanbevelingen om mee te nemen in volgende adviezen.

1. Sinds 2014 wordt in de Zeespiegelmonitor voorgesteld om windcorrectie toe te passen op de tijdreeks voor de zes hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust. Sinds 2016 wordt dit als voorkeursmethode standaard toegepast. Ook in de internationale peer-reviewed literatuur wordt deze methode al beschreven sinds 2014². In ons advies passen wij dezelfde methode toe als gebruikt in de Zeespiegelmonitor om trend en versnelling over de afgelopen periode (2000-2019) te bepalen. Nieuw is dat wij de op deze manier bepaalde versnelling over de periode 1975-2000 meenemen in de extrapolatie naar het beleidsscenario. Wij willen benadrukken dat de methode om van waarnemingen uit het verleden trend en versnelling te extrapoleren naar een beleidsscenario niet eenduidig is en dat het belangrijk is om de wetenschappelijke discussie te blijven voeren over hoe de waargenomen trend en versnelling te extrapoleren naar het te actualiseren beleidsscenario.
2. Het beleids- en richtscenario voor de zeespiegelstijging in de Waddenzee zijn gebaseerd op (gecorrigeerde) waterstandswaarnemingen en KNMI-scenario's geldend voor de gehele kust van Nederland (en dus niet specifiek voor de Waddenzee). Door meetgegevens van meer meetstations te gebruiken zijn de daaruit afgeleide trends robuuster. Tevens zijn toekomstscenario's specifiek voor de Waddenzee momenteel niet beschikbaar. Waarnemingen van de stations langs de Waddenzee in de laatste ca. 30 jaar laten een snellere zeespiegelstijging zien dan voor de stations langs de Noordzeekust. Voor dat verschil bestaan op dit moment hypotheses, maar nog geen sluitende verklaringen.

² Dangendorf et al. 2014a, 2014b



Mocht deze trend in Waddenzee ten opzichte van Noordzeekust in de toekomst doorzetten, dan ~~beveelt de expertgroep~~ aan om specifieke Waddenzee-scenario's te ontwikkelen; wat alleen kan als de oorzaken voor de verschillende trends in de Waddenzee en de Noordzee beter worden begrepen. De expertgroep verzoekt daarom het ministerie om lopend onderzoek hiernaar te steunen.

3. De vertaling van de IPCC-projecties naar de Nederlandse kust in de KNMI-klimaatprojecties van het richtscenario sluit niet aan bij het beleidsscenario. Dit komt omdat in de KNMI- (en IPCC-) modellen de stijgsnelheid sneller toeneemt na 2010 dan in de individuele waarnemingen.

Relatie met vorige advies en recente publicaties

Dit advies geeft een basis op grond waarvan de overheid de gebruiksruimte voor de periode 2024-2029 kan vaststellen. De waarden van het beleidsscenario liggen hoger dan in het vorige advies uit 2020 (gemiddeld 2,4 mm/jaar voor de periode 2021-2026), de waarden van het SodM-advies uit 2022 (gemiddeld 3,3 mm/jaar voor de periode 2021-2026) en de waarden uit de Zeespiegelmonitor uit 2023 (gemiddeld 2,9 mm/jaar voor de periode 1993-2022). De afwijking ten opzichte van het vorige advies komt met name door (1) het gebruik van een meer geavanceerd regressiemodel waarbij op voorhand geen aanname wordt gedaan over de aanvang en mate van een eventuele versnelling, (2) het gebruik van een versnellingsterm en (3) door de toevoeging van recentere waarnemingen.

In hierboven genoemde adviezen en de Zeespiegelmonitor is de trend over de afgelopen periode (ca. 1993-tot eind meetperiode) constant gehouden en is dezelfde waarde gebruikt voor de beleidsadviesperiode. In het voorliggende advies is de trend die wij als uitgangspunt genomen hebben consistent met vorige adviezen maar is een versnellingsterm erbij opgeteld om te extrapoleren naar de beleidsadviesperiode (2024-2029).

Het beleidsscenario sluit nog steeds aan bij de waargenomen trends in getijdestations (na windopzetcorrectie) en satellietobservaties en de recente wereldwijde trends (zie bijlage: Tabel 3.3).

Hopende u hiermee voldoende van dienst te zijn geweest en met vriendelijke groet,



Voorzitter expertgroep

Bijlage: onderbouwing advies

1 Inleiding

Dit advies over de relatieve zeespiegelstijging¹ is opgesteld ten behoeve van de vaststelling van de gebruiksruimte voor delfstofwinning onder de Waddenzee volgens het 'Hand aan de Kraan' principe zoals in 2006 geformuleerd in de Passende Beoordeling (PB, zie ook De Waal et al., 2012)². Centraal in de PB staat dat gaswinning geen schade mag veroorzaken aan de natuurwaarden van het Waddengebied. Vanuit dat oogpunt is in de PB het begrip 'gebruiksruimte' geïntroduceerd. De belasting door bodemdaling ten gevolge van delfstofwinning dient binnen de gebruiksruimte te vallen. De gebruiksruimte is gelijk aan de draagkracht van individuele kombergingen tegen het tempo van relatieve zeespiegelstijging (meegroeivermogen) minus de relatieve zeespiegelstijging.

De relatieve zeespiegelstijging ten gevolge van autonome processen is het onderwerp van dit advies. De zeespiegel in de Waddenzee is aan het stijgen, tegelijkertijd is er onzekerheid over de snelheid waarmee dit gebeurt. Daarom worden de nieuwste inzichten rondom de ontwikkeling van de zeespiegelstijging ten minste iedere vijf jaar opnieuw beschouwd. Naar aanleiding van recente publicaties (Zeespiegelmonitor 2022 en recentere publicaties) en een advies van Staatstoezicht op de Mijnen (d.d. december 2022) heeft Staatssecretaris Vijlbrief gevraagd om, eerder dan gebruikelijk, een herziening van het beleidsscenario per 2024³. De expertgroep, speciaal bij elkaar gebracht voor dit advies, heeft opdracht gekregen om het scenario voor relatieve zeespiegelstijging te actualiseren (voor de periode 2024-2029 en daarna) ten behoeve van de gebruiksruimtetoeets voor diverse vormen van delfstofwinning onder de Waddenzee. Deze actualisatie is opgesteld door een nieuwe expertgroep, bestaande uit experts van Deltares, KNMI, TNO en Universiteit Utrecht die eerder hebben geadviseerd (Adviezen 2020, 2022), aangevuld met de experts van TU Delft en NIOZ die Staatstoezicht op de Mijnen heeft geraadpleegd. Als onderdeel van deze actualisatie heeft de expertgroep Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) gehoord. Hierbij is het advies en de onderbouwing van SodM toegelicht.

Het scenario voor de periode 2024-2029 wordt conform de gebruiksruimtesystematiek opgesteld op basis van extrapolatie van waarnemingen bij meetstations langs de Nederlandse kust. Omdat vijf jaar een korte periode is voor de planning van een mijnbouwonderneming, is een doorkijk naar de periode daarna van belang (PB, 2006). Voor deze periode is een 'richtscenario' opgesteld tot 2050 op basis van de KNMI-klimaatprojecties (gepubliceerd op 9 oktober 2023) voor de Nederlandse kust⁴.

De onderbouwing van het advies is als volgt opgezet. Eerst wordt de historie van het beleidsscenario (vanaf 1 januari 2007, toen voor het eerst een beleidsscenario is opgesteld) beschreven (hoofdstuk 2). Daarna worden aandachtspunten bij het bepalen van de gerealiseerde zeespiegelstijging en het opstellen van een zeespiegelstijgingsverwachting behandeld op basis van recente wetenschappelijke inzichten (hoofdstuk 3). Deze aandachtspunten zijn meegenomen bij het opstellen van het nieuwe beleids- (hoofdstuk 4) en richtscenario (hoofdstuk 5). Het geadviseerde beleids- en richtscenario is opgenomen in hoofdstuk 6.

¹ In de context van kustbeheer wordt de term zeespiegel gebruikt voor de over langere tijd gemiddelde hoogte van het zeeoppervlak, waaruit de langjarige fluctuaties (getij, windopzet, etc.) nagenoeg zijn verwijderd. Met de term 'huidige zeespiegel' wordt zowel de huidige stand als de trend, die leidde tot de huidige stand bedoeld, ofwel de huidige zeespiegelstand en de huidige zeespiegelstijging (Baart et al., 2019).

² Het 'Hand aan de Kraan' principe is onderdeel van de Passende Beoordeling van het Rijksprojectbesluit over aardgaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen opgesteld door het Ministerie van Economische Zaken (2006).

³ Kamerstuk 'Herziening gebruiksruimte Waddenzee', 16 juni 2023.

⁴ Aan het richtscenario kunnen geen rechten worden ontleend.

2 Historie van het beleidsscenario

Het eerste beleidsscenario is opgesteld in 2006 en is van kracht geworden per 1 januari 2007. De scenario's zijn daarna elke vijf jaar geactualiseerd conform de nieuwste inzichten.

Er zijn beleids- en richtscenario's opgesteld per 1 januari 2006, 1 januari 2011, 1 januari 2016 en 1 januari 2021, deze zijn weergegeven in figuur 2.1. Een korte samenvatting van deze eerdere beleidsscenario's volgt hieronder.

2.1 *Beleids- en richtscenario per 1.1.2006*

De ontwikkeling van het eerste beleidsscenario staat in detail beschreven in de PB (Ministerie van Economische Zaken, 2006). Voor dit beleidsscenario zijn meetgegevens gebruikt van meetstations⁵ langs de Nederlandse Waddenkust over de periode 1985-2000. Voor deze periode van 15 jaar resulteerde daaruit een gemiddelde zeespiegelstijgingssnelheid van 2,24 mm/jaar. Hoewel de meetgegevens geen significante versnelling van de zeespiegel lieten zien, is uit voorzorg een versnelling verondersteld van 0,018 mm/jaar². Deze waarde is afgeleid door Church en White (2006) uit een wereldwijde dataset. Het beleidsscenario is zo opgebouwd dat het start met de versnelling in 1985 en aansluit bij de waargenomen gemiddelde snelheid over de periode 1985-2000. Die beide voorwaarden bepaalden de snelheid per 1 januari 2007 op 2,484 mm/jaar.

2.2 *Actualisatie beleids- en richtscenario per 1.1.2011*

Voor de eerste actualisatie van het beleidsscenario is gebruik gemaakt van een rapport van Deltares, opgesteld in opdracht van de Waterdienst van Rijkswaterstaat ten behoeve van de suppletiebehoefte langs de Nederlandse kust (Dillingh et al., 2010). De in 2006 vastgestelde versnelling van 0,018 mm/jaar² bleek niet kleiner te zijn dan de door Deltares in 2010 als "mogelijk" uit gegevens afgeleide waarde. Hieruit is geconcludeerd dat de uitgangspunten van het beleidsscenario 2007-2011 nog steeds van toepassing waren (TNO, 2011). Daarmee is het beleidsscenario voor de zeespiegelstijging voor de periode 2011-2016 een voortzetting van het beleidsscenario 2007-2011.

2.3 *Actualisatie beleids- en richtscenario per 1.1.2016*

Voor de tweede actualisatie van het beleidsscenario is gebruik gemaakt van de Zeespiegelmonitorrapporten uit 2014 en 2015 (De Ronde et al., 2014, Baart et al., 2015). Deze rapporten beschrijven de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust met een lineaire snelheid. De studies geven geen eenduidige indicatie voor een significante versnelling op regionale schaal in de Nederlandse kustzone. Uitgangspunt voor deze actualisatie van het beleidsscenario was de gemiddelde zeespiegelstijging over de periode 1890-2013 voor de zes Nederlandse hoofdmeetstations⁶ (TNO, 2016). Dit resulteerde, na correctie voor windeffecten, in een gemiddelde snelheid van 1,76 mm/jaar voor de periode 1890-2013, plus een extra 0,28 mm/jaar voor de periode 1994-2013. Uitgaande van een versnelling over de periode 1890-2013 leidt dit tot een waarde van 0,0076 mm/jaar² en een snelheid van 2,181 mm/jaar voor het referentiejaar 2007. Deze afgeleide waarden zijn consistent met de wereldwijde waarnemingen voor dit referentiejaar (Church & White, 2011).

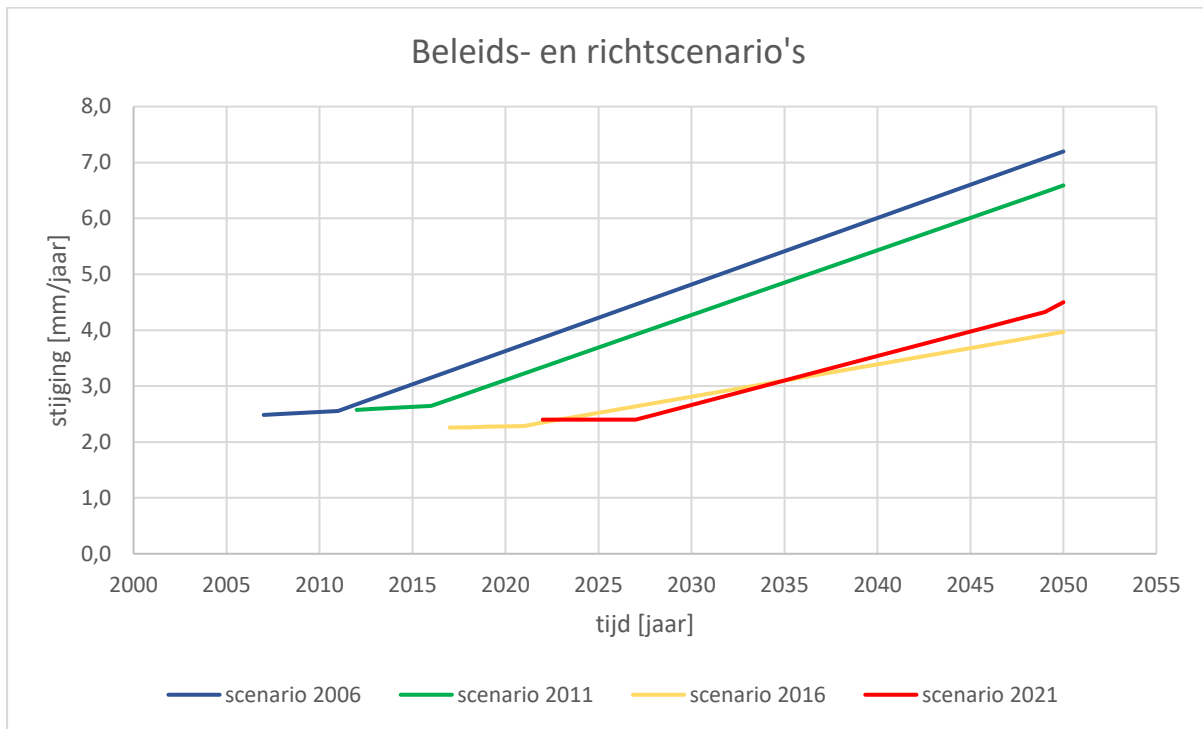
2.4 *Actualisatie beleids- en richtscenario per 1.1.2021*

Voor de derde actualisatie van het beleidsscenario is gebruik gemaakt van het Zeespiegelmonitorrapport uit 2019 (Baart et al., 2019). Dit rapport beschrijft dat langs de Nederlandse kust niet eenduidig is vast te stellen of de zeespiegel versneld stijgt. Enerzijds wordt gesteld dat er geen versnelling aantoonbaar is. Anderzijds worden er statistische analyses gepresenteerd waarvan sommige wijzen op het optreden van een versnelde stijging van de zeespiegel aan het einde van de 20e eeuw. Het 'gebroken trendmodel' gaat uit van een knikpunt in 1993 met een zeespiegelstijgingssnelheid, na correctie van windeffecten, van 1,8 mm/jaar in de periode voor het knikpunt (1890-1993) en van 2,4 mm/jaar na het knikpunt (1993-2017). Op basis van voorgaande inzichten is voor het beleidsscenario aangenomen dat de zeespiegelstijging sinds het einde van de 20e eeuw is versneld. Uitgangspunt voor de actualisatie van het beleidsscenario

⁵ Den Helder, Kornwerderzand buiten, Vlieland haven, West-Terschelling, Harlingen, Nes, Schiermonnikoog, Lauwersoog, Eemshaven en Delfzijl.

⁶ Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl.

voor de periode 2021-2026 was de gemiddelde zeespiegelstijging over de periode 1993-2017, vanaf het moment dat er een versnelling zichtbaar is in de data, voor de zes Nederlandse hoofdmeetstations⁷ (Advies, 2020). Dit resulteerde in een gemiddelde snelheid van $2,4 \pm 1,5$ mm/jaar, dit is de waarde waarbij gecorrigeerd is voor windeffecten.



Figuur 2.1 Historische beleids- en richtscenario's voor de relatieve zeespiegelstijging in de Waddenzee (TNO, 2023).

2.5 Advies beleidsscenario Staatstoezicht op de Mijnen per 1.1.2021

SodM heeft eind 2022 een advies uitgebracht. Dit advies is aan de experts toegelicht en wordt hier genoemd ter volledigheid. Het SodM-advies is gebaseerd op een schatting van de zeespiegelstijgingstrend door het KNMI welke volgens de methode beschreven in Keizer et al. (2023) is berekend op basis van de metingen van de zeespiegelstand van de zes hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust in de periode 1992-2021. SodM adviseerde een zeespiegelstijging van gemiddeld 3.3 mm/jaar voor de jaren 2021-2026 te hanteren als beleidsscenario, waarbij gecorrigeerd is voor windeffecten.

⁷ Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl.

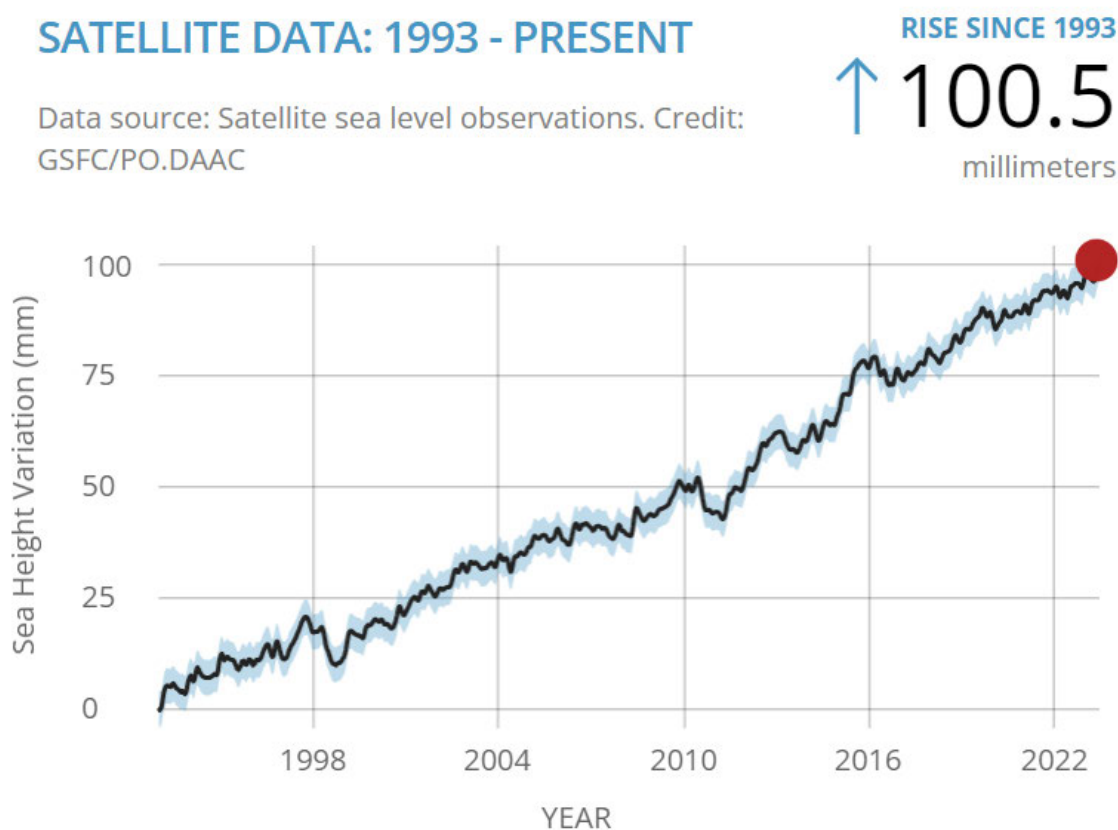
3 Aandachtspunten voor het opstellen van een beleidsscenario

Als opmaat naar het beleidsscenariovoorstel geeft deze paragraaf een overzicht van de inzichten uit recente publicaties en meetgegevens. Deze paragraaf is als volgt opgebouwd. Eerst worden de inzichten omtrent de wereldwijde zeespiegelstijging beschreven vanuit zowel de temporele als de ruimtelijke variabiliteit; de wereldwijde zeespiegelstijging werkt door in de zeespiegel van de Noordzee en de Waddenzee. Daarna volgt een zelfde beschrijving voor de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Vervolgens wordt de versnelling in de zeespiegelstijging behandeld, zowel wereldwijd als langs de Nederlandse kust. Tenslotte worden de belangrijkste aandachtspunten voor het opstellen van een beleidsscenario samengevat.

3.1 Zeespiegelstijging wereldwijd

3.1.1 Temporele variabiliteit

Over de periode 1993-2023 bedraagt de wereldwijde gemiddelde zeespiegelstijging berekend op basis van satellietdata 3,4 mm/jaar (NASA, 2023a). Temporele afwijkingen van deze gemiddelde zeespiegelstijging (Fig. 3.1) zijn het gevolg van meerdere processen, waaronder de uitzetting van water door opwarming (tijdschaal van tientallen jaren), verandering in de verdeling van warm/koud en zout/zoet water in de oceanen samenhangend met veranderende zeestromen (tijdschaal van jaren oplopend tot een eeuw), massaverlies van grote ijskappen op Groenland en Antarctica (tijdschaal van tientallen jaren tot vele eeuwen) en het afsmelten van gletsjers op land (tijdschaal van tientallen jaren tot eeuwen) (Van den Hurk & Geertsema, 2020). Massaverlies van de Groenlandse ijskap levert een belangrijke bijdrage aan de wereldwijde zeespiegelstijging sinds het einde van de 20^e eeuw; over de periode 1993-2018 is de bijdrage van de Groenlandse ijskap toegenomen tot 0,65 mm/jaar. Massaverlies op Antarctica heeft een kleinere bijdrage geleverd aan de wereldwijde zeespiegelstijging; 0,32 mm/jaar (Dorland et al., 2023).



Figuur 3.1 Verandering van de wereldwijd gemiddelde zeespiegelstand sinds 1993, op basis van satellietmetingen. Deze grafiek laat de verandering van januari 1993 tot en met juni 2023 zien (NASA, 2023a).

3.1.2 Ruimtelijke variabiliteit

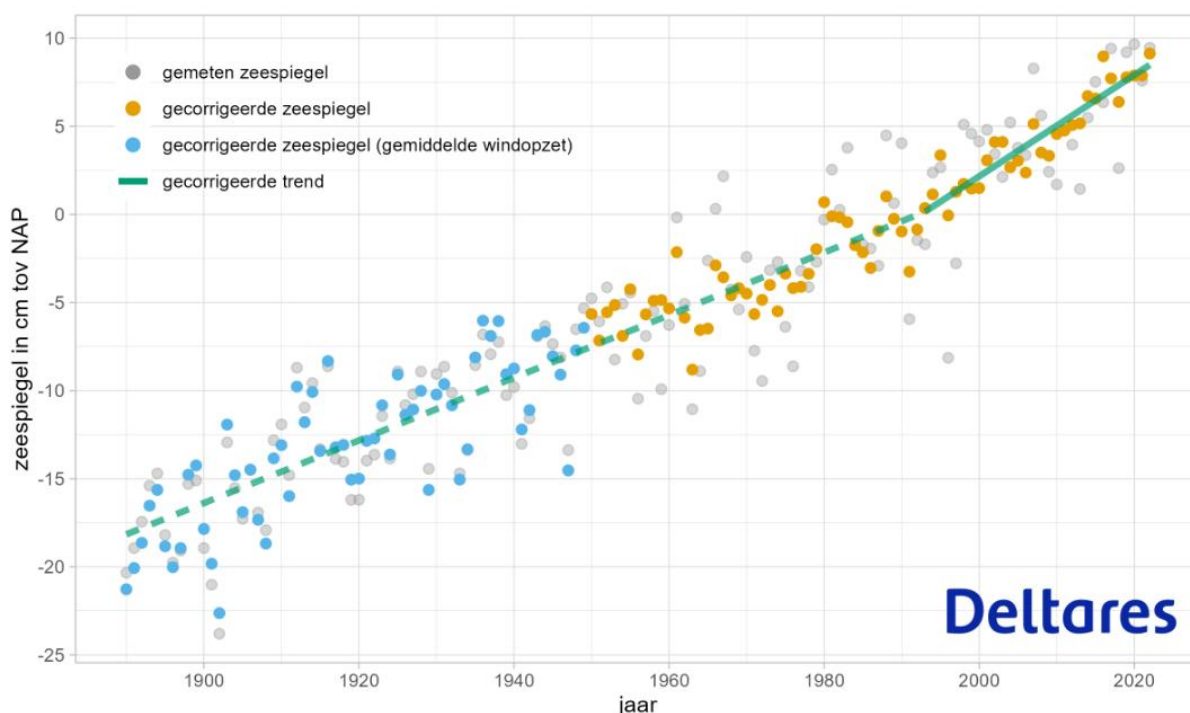
Zoals waarnemingen van getijdestations en satellietmetingen laten zien kunnen regionale veranderingen in de zeespiegel afwijken van het wereldgemiddelde. Ook de toekomstige veranderingen door de opwarming van het klimaat wereldwijd zullen niet overal even groot zijn. Lokaal wordt de hoogte van de zeespiegel langs de kust beïnvloed door variaties in getij en windpatronen (stormopzet of -afzet), langjarige perioden met gemiddeld veel regen of juist sterke verdamping, langjarige luchtdrukvariaties boven zee, en oceaanstromingen. Daarnaast kunnen verschillen ontstaan door bodemdaling, kustmorfologie en de aanleg van dijken of dammen, waardoor de aanvoer van zoet water afneemt en de bestaande kustmorfologie verandert. Op meer regionale schaal treden variaties in zeeniveau op vanwege massaveranderingen door de van jaar tot jaar verschillende mate van afsmelten van ijskappen en gletsjers (en sneeuwval daarop) waardoor het zwaartekrachtsveld op aarde van plek tot plek verandert. Elke ijskap heeft een specifieke vingerafdruk voor de mondiale herverdeling van het afgesmolten ijs die kan veranderen met de tijd. Massaverlies van de Antarctische ijskap heeft een relatief groot effect op de zeespiegelstand langs de Nederlandse kust. De nettobijdrage van de Groenlandse ijskap op de zeespiegelstand langs de Nederlandse kust is minder groot. Om te weten hoe klimaatverandering de zeespiegelstijging wereldwijd over de langere termijn (5 tot 10-tallen jaren) beïnvloedt (en andersom) is het meten van het (lokale) zeeniveau niet genoeg. Er is een goed beeld nodig over hoe variaties in zeestromingen, wind en getijden, die niet altijd samenhangen met klimaatverandering, in de (lokale) zeespiegel hebben doorgewerkt (KNMI, 2023a).

3.2 Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust

3.2.1 Temporele variabiliteit

De tijdschaal waarop de wereldwijde zeespiegelprocessen (paragraaf 3.1.1) effect hebben op de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (Fig. 3.2) verschilt per proces (Van den Hurk & Geertsema, 2020). Ten eerste zijn er variaties in de zeespiegelstand veroorzaakt door (wereldwijd optredende) variaties in getijcomponenten. Van deze getijcomponenten heeft vooral de nodale cyclus van 18,613 jaar invloed (Baart et al., 2019; Keizer et al., 2023; Stolte et al., 2023). Daarbovenop kunnen jaarlijks verschillen ontstaan door het wisselend aantal stormen en de intensiteit daarvan; stormrijke jaren kunnen leiden tot een centimeters hogere gemiddelde zeespiegelstand. De windopzet varieert sterk van jaar tot jaar en kan over perioden van 5 jaar (periode beleidsscenario) plus of min 3 cm per jaar bedragen (windopzet afwijking van gemiddeld = -3,1 cm in 2021; Stolte et al., 2023, p. 24), dit is 10 maal meer dan de langjarige trend in de zeespiegelstijging. Ook over perioden van 10-30 jaar zijn variaties in de windopzet een factor die de trend kunnen moduleren met 10-20% van de langjarige trend (Fig. 3.3a en d). Decennia met veel kustgerichte wind (vanuit het westen) hebben gemiddeld genomen een hogere zeespiegel. Decennia met veel kustafwaartse wind (vanuit het oosten) leveren duidelijk lagere zeespiegelstanden. Verder kunnen oceaanstromingen fluctueren en afwijkingen voor een periode tot tientallen jaren veroorzaken (Vermeersen et al., 2018; Van den Hurk & Geertsema, 2020). Tenslotte kunnen seizoenverschillen in luchtdruk en temperatuur en dichtheid van het oceaانwater kortdurende (en voor het beleidsscenario weinig relevante) variaties in de zeespiegelstand veroorzaken.

Waterstandsgegevens kennen een aanzienlijke variatie, met name door processen met een stochastische verdeling in optreden. Hierdoor is de onzekerheidsband om een te berekenen trend groot. Dit geldt in het bijzonder voor het tijdperk waarin een sluitend meteorologisch meetnetwerk nog ontbreekt (vóór 1949) en voor korte termijn bepalingen van de zeespiegelstand (1-5 jaar), omdat waterstanden sterk zullen variëren onder invloed van de voornoemde stochastische verdeling in optreden van de processen. Door de waarnemingen langs de Nederlandse kust te corrigeren voor de nodale getijcyclus en voor de langjarige (>15 jaar) variaties in de windopzet kan de meerjarige temporele trend in de zeespiegelstijging zo zuiver mogelijk worden bepaald en vergeleken met de wereldwijd gemiddelde trend in zeespiegelstijging (Fig. 3.3).



Figuur 3.2 De waargenomen zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust op basis van de jaargemiddelde zeespiegelstand van vijf hoofdmeetstations⁸ (punten) voor de periode 1890-2022. De waarde voor elk jaar is gebaseerd op ca. 262.000 metingen. De grijze punten representeren de gemeten zeespiegelstand, de blauwe en oranje punten zijn voor elk jaar gecorrigeerd voor de windopzet; correctie blauwe punten o.b.v. de gemiddelde windopzet, correctie oranje punten o.b.v. het GTSM⁹ (Deltares, 2023; Stolte et al., 2023). De trendlijn voor de jaargemiddelde zeespiegelstand is bepaald met een regressiemodel waarin informatie over de nodale cyclus is meegenomen en waarin is gecorrigeerd voor de windopzet (Stolte et al., 2023).

Zeespiegelstijgingstrend

De jaargemiddelde zeespiegelstand voor de Nederlandse kust is voor 2021 en 2022 vastgesteld op respectievelijk 7,6 cm en 9,5 cm boven Normaal Amsterdams Peil (NAP) (Stolte et al., 2023; Deltares, 2023). De relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is recent bepaald in meerdere onderzoeken op basis van metingen van getijddestations langs de Nederlandse kust (Tabel 3.1, Steffelbauer et al., 2022; Stolte et al., 2023; Keizer et al., 2023) met als belangrijkste methodische verschillen: het aantal meegenomen getijddestations, de correctie voor variaties in getij en windopzet en het toegepaste regressiemodel. Hieronder worden de drie studies methodisch toegelicht.

Tabel 3.1 Vastgestelde relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor verschillende perioden (¹Steffelbauer et al., 2022; ²Stolte et al., 2023; ³Keizer et al., 2023). De natuurlijke bodemdaling maakt hier onderdeel van uit. De natuurlijke bodemdaling bedraagt gemiddeld voor de zes hoofdgetijddestations 0,45 mm/jaar (Hijma & Kooi, 2018; Hijma et al., 2022).

Periode	Relatieve zeespiegelstijging [mm/j] [5-95 percentiel]	Aantal getijddestations	Regressiemodel
1993-2018 ^a	2.7 [2.3-3.1] ¹	8	PWLF
1993-2021 ^a	2.9 [2.5-3.3] ²	5	PWLF, 1993 fixed
2000-2019 ^b	2.9 [2.4-3.5] ³	6	GAM
2000-2019 ^c	2.7 [2.1-3.4] ³	6	GAM

^a gecorrigeerd voor nodaal getij en wind

^b gecorrigeerd voor nodaal getij en wind (TrNtW-model)

^c alleen gecorrigeerd voor nodaal getij (TrNt-model)

Steffelbauer et al. (2022) hebben een lineaire trend berekend op basis van de maandgemiddelde zeespiegelstand uit meetgegevens van *acht* getijddestations; Vlissingen, Maassluis, Hoek van Holland,

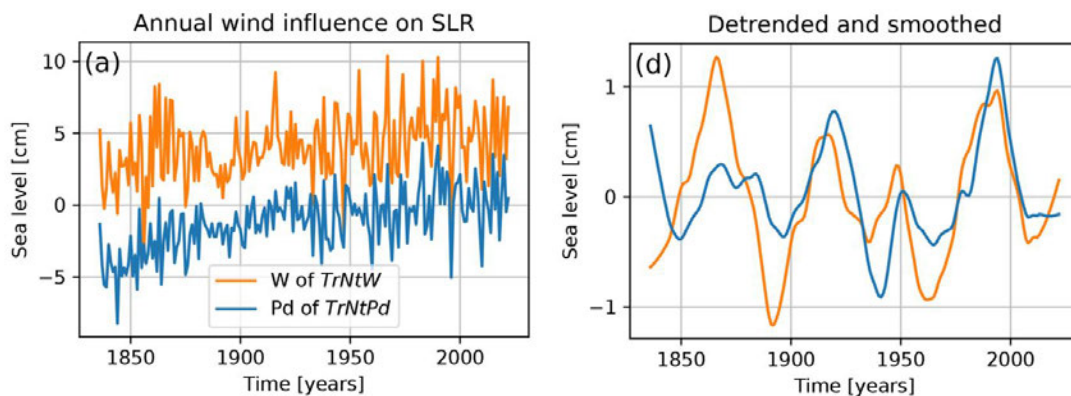
⁸ Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder en Harlingen.

⁹ GTSM = Global Tide and Surge Model (Muis et al., 2016, 2020), welke is gebruikt voor de berekening van de windopzet.

IJmuiden, Den Helder, Harlingen, Delfzijl en Cuxhaven. In de eerste stap is het zeespiegelsignaal¹⁰ uit de meetgegevens bepaald met gebruikmaking van een niet-geobserveerd componentenmodel (UCM). In de tweede stap is een mogelijke versnelling bepaald door een stuksgewijze lineaire functie¹¹ te fitten op het signaal¹². Stolte et al. (2023) hebben een lineaire trend in de zeespiegel berekend, die de totale bodemdaling¹³ en de absolute stijging van de zeespiegel bevat op basis van de jaargemiddelde zeespiegelstand uit meetgegevens van vijf hoofdgetijdestations; Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder en Harlingen. Keizer et al. (2023) hebben een trend berekend op basis van de jaargemiddelde zeespiegelstand uit meetgegevens van de zes hoofdgetijdestations; Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl met een nieuwe tijdreeksbenadering, die gebruik maakt van een gegeneraliseerd additief model (GAM). Dit model kan tegelijkertijd een schatting maken van een niet-lineaire trend en het optimale multi-lineaire regressiemodel zonder vooraf aannames te maken over de vorm van de trend of het moment van de aanvang van een versnelling of vertraging ('knikpunten')¹⁴.

In alle genoemde studies is een correctie uitgevoerd voor de variatie in de jaargemiddelde zeespiegelstand door het nodaal getij en de windopzet (verklaarbare langjarige variantie) om de trend in de zeespiegelstijging te bepalen.

Figuur 3.3a en 3.3d laten duidelijk zien dat de windvariatie wordt gekenmerkt door verschillende periodiciteiten. Er zijn grote variaties te zien in de meetgegevens per 1-5 jaar en langjarige variaties groter dan 20 jaar. In figuur 3.3d zijn 30-70 jaar cycli duidelijk te zien. Deze windregime fluctuaties met cycli van 20 jaar of meer zijn wetenschappelijk meermaals aangetoond (Frederikse & Gerkema, 2018; Dangendorf et al., 2014a, 2021), waarbij onderzoek naar de precieze oorzaken (waaronder zee/oceaan temperatuurvariaties) en daaraan gerelateerde wind effecten gaande is.



Figuur 3.3 Windinvloed op de jaargemiddelde zeespiegelstand langs de Nederlandse kust gebaseerd op metingen van zes hoofdgetijdeemtestations (oranje lijn). a) Tijdreeks van jaarlijks gemiddelde waarden van de windinvloed op de zeespiegelstand (oranje lijn). d) Gedetrende en gesmoothte tijdserie uit figuur a (oranje lijn, Keizer et al., 2023).

Voor de langjarige fluctuaties in de windopzet kan met behulp van voor de Noordzee beschikbare weergegevens gecorrigeerd worden (Dangendorf et al., 2014b, 2021). Er bestaan verschillende

¹⁰ Stereodynamische en barometrische zeespiegelstijging.

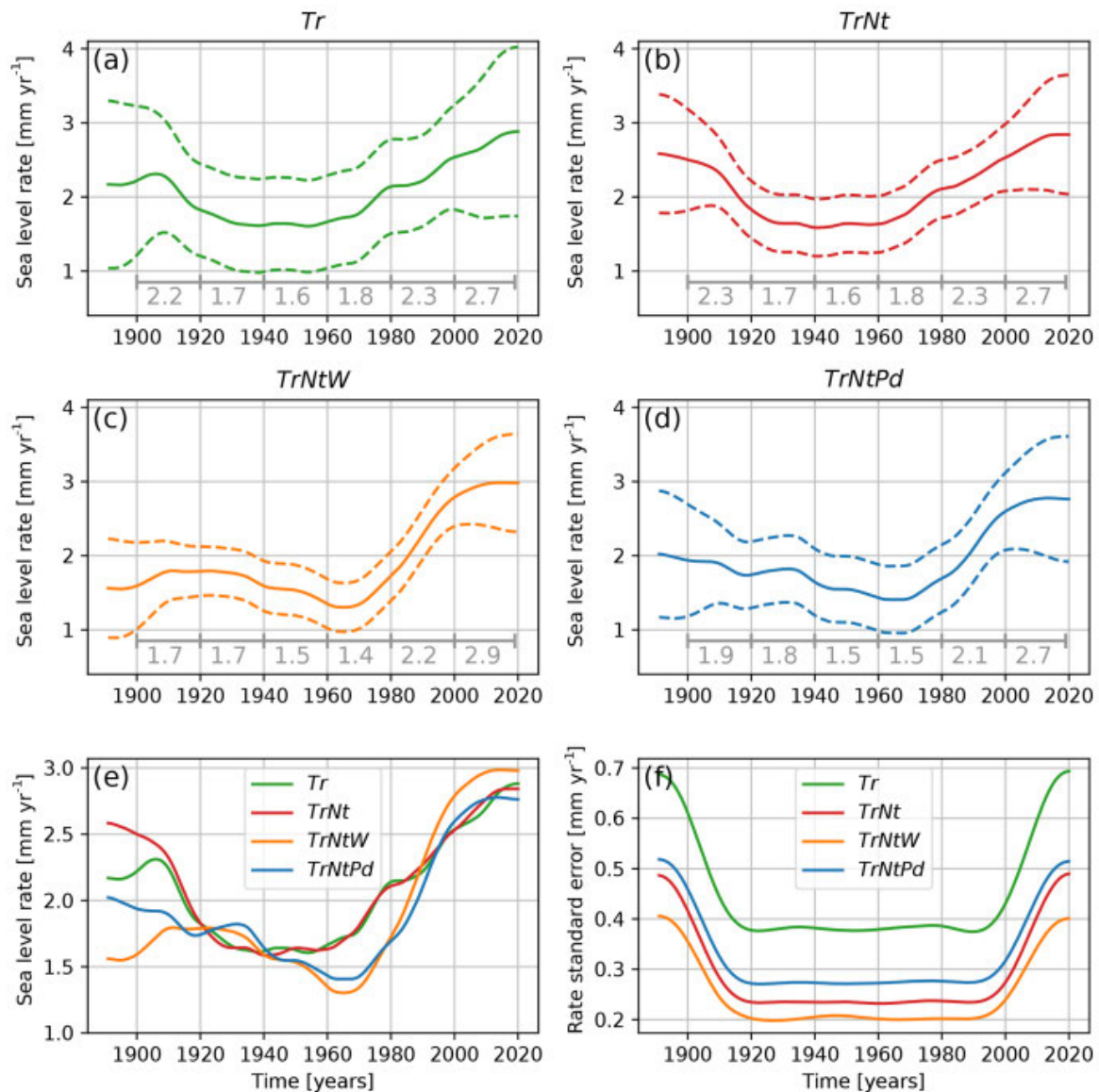
¹¹ *piece wise* lineaire functie of PWLF

¹² De richtingscoëfficiënt van elk lijnsegment geeft de zeespiegelstijgingssnelheid weer, en een knikpunt in de PWLF geeft een verandering in de zeespiegelstijgingssnelheid weer; een toename van de richtingscoëfficiënt betekent een toename van de zeespiegelstijgingssnelheid.

¹³ De antropogene bodemdaling door olie- en gaswinning bij meetstation Hoek van Holland bedraagt $1,0 \pm 0,3$ cm in de periode 1991-2020. Gemiddeld is dit 0,3 mm/jaar (Hijma, 2021). Antropogene bodemdaling door gaswinning speelt ook een rol voor meetstation Delfzijl. Nabij gelegen NAP-peilmerken duiden op een verzakking van 24 cm sinds 1973. In de manier waarop de waarden voor dit station door Rijkswaterstaat zijn bijgehouden, is voor het wegzakken van deze peilschaal steeds verdisconteerd (zie Baart et al. 2019). Echter, voor de laatste 10-15 jaar is het onzeker of de verticale correctie correct is doorgevoerd (Honihing et al., 2021). Voor de jaren waarin de waarden zijn gecorrigeerd bevatten de meetgegevens van hoofdmeetstation Delfzijl (figuur 3.3) geen antropogene bodemdaling. Voor de waarden van de laatste 10-15 jaar waarop **mogelijk** nog geen correctie is toegepast bevatten de meetgegevens van hoofdmeetstation Delfzijl mogelijk wel antropogene bodemdaling.

¹⁴ De ligging van een 'knikpunt' kan de trend beïnvloeden, omdat de trendlijn bij het begin van de versnelling anders kan uitkomen dan het geval is bij een vloeiende curve.

datasets voor deze weergegevens, die vergelijkbare of overeenkomstige correcties opleveren (NCEP, ERA5, 20CR). Door de correctie voor nodaal getij en langjarige windfluctuaties is het mogelijk om een zo zuiver mogelijk zeespiegelstijgingssignaal uit de meetreeksen te bepalen met een zo klein mogelijke onzekerheidsbandbreedte. Figuur 3.4 laat de trends in de zeespiegelstijging zien voor de periode 1891-2019 cf. Keizer et al. (2023) voor de regressiemodellen, waarbij niet is gecorrigeerd voor nodaal getij of windopzet (Fig. 3.4a), is gecorrigeerd voor nodaal getij (Fig. 3.4b) en is gecorrigeerd voor nodaal getij en windopzet (Fig. 3.4c).



Figuur 3.4 De trends in de zeespiegelstijging voor de periode 1891-2019 cf. Keizer et al. (2023) voor de regressiemodellen waarbij a) niet is gecorrigeerd voor nodaal getij of windopzet, b) is gecorrigeerd voor nodaal getij, c) is gecorrigeerd voor nodaal getij en windopzet, en d) een grootschalige drukgradiënt is gebruikt als voorspellende variabele voor het windeffect op de zeespiegelstand. De gestippelde lijnen tonen het 5 en 95 percentiel van het onzekerheidsbereik (Keizer et al., 2023). De cijfers in grijs onder de curves geven de gemiddelde waarde voor de mediaan van de zeespiegelstijgingssnelheid voor zes opeenvolgende perioden van 20 jaar ([1900-1919], [1920-1939], [1940-1959], [1960-1979], [1980-1999] en [2000-2019]). e) Mediane zeespiegelstijgingssnelheid voor de figuren a-d. f) Standaardfout in de zeespiegelstijgingssnelheid voor figuren a-d (Keizer et al., 2023).

De onzekerheid is het kleinst voor het TrNtW-model waarbij is gecorrigeerd voor nodaal getij en wind (Fig. 3.4f): de correcties introduceren meer vrijheidsgraden. De onzekerheid neemt bij alle modellen toe in de periode 2000-2020 als gevolg van het incompleet kunnen toepassen van het

smoothing-filter aan het einde van de tijdreeks: aan het einde van de tijdreeks worden meer punten meegenomen voorafgaand aan het jaar waarop de curve wordt bepaald dan punten volgend op dat jaar.

Bodemdaling

Voor de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is de natuurlijke bodemdaling een factor van belang. Gemiddeld over de zes hoofdgetijdstations, bedraagt de natuurlijke bodemdaling ongeveer 0,45 mm/jaar (Hijma & Kooi, 2018; Hijma 2022; Stolte et al., 2023¹⁵). Ook bij weglating van hoofdgetijdstation Delfzijl bedraagt de natuurlijke bodemdaling ongeveer 0,45 mm/jaar. Door met name de mogelijk onvolledige correctie voor de bodemdaling staat de betrouwbaarheid van het hoofdmeetstation Delfzijl (zie voetnoot 13, p. 7) ter discussie en hebben Stolte et al. (2023) de meetgegevens van dit station niet meegenomen. De meetgegevens van de overige stations vertonen onderling meer vergelijkbare trends in de stijging sinds 1993: tussen 2,3 en 3,3 mm per jaar op basis van trendanalyse van de jaargemiddelde zeespiegelstanden per meetstation. Ze worden daarom voldoende betrouwbaar geacht en zijn in alle drie de onderzoeken gebruikt.

3.2.2 Ruimtelijke variabiliteit

De grootte en snelheid van de waterstandsfluctuaties door het getij langs de Nederlandse kust variëren aanzienlijk. Deze variaties worden bepaald door twee tegen de klok in draaiende getijgolven, één in de noordelijke Noordzee en één in de zuidelijke Noordzee. Ter hoogte van de westelijke Waddenzee interfereren deze golven met elkaar. Op regionaal niveau staat de gemiddelde zeespiegelstand in het noorden van Nederland (Harlingen en Delfzijl) altijd hoger dan in het zuiden (Vlissingen) (Fig. 3.5).

De zeespiegel bij de noordelijke meetstations lijkt iets sneller te stijgen dan bij de meer zuidelijke stations (Tabel 3.2, Stolte et al., 2023). Dit verschil kan mogelijk (gedeeltelijk) worden verklaard door een verschil in bodemdalingssnelheid veroorzaakt door de glacio-isostatische bodemdaling (GIA)¹⁶, welke groter is in het noorden dan in het zuiden (Vermeersen et al., 2018; Hijma, 2022). Echter, de beschouwde dataset is te klein om hierover harde conclusies te kunnen trekken.

De extra versnelling bij Delfzijl (Tabel 3.2), in het bodemdalingsgebied als gevolg van de gaswinning in het Groningen gasveld, kan mogelijk deels verklaard worden, doordat hier de verticale correcties achterlopen (Honingh et al., 2021). Ook kent het getijdstation bij Delfzijl vanwege de ligging in het Eems-estuarium een grotere invloed van stormen dan de andere hoofdmeetstations.

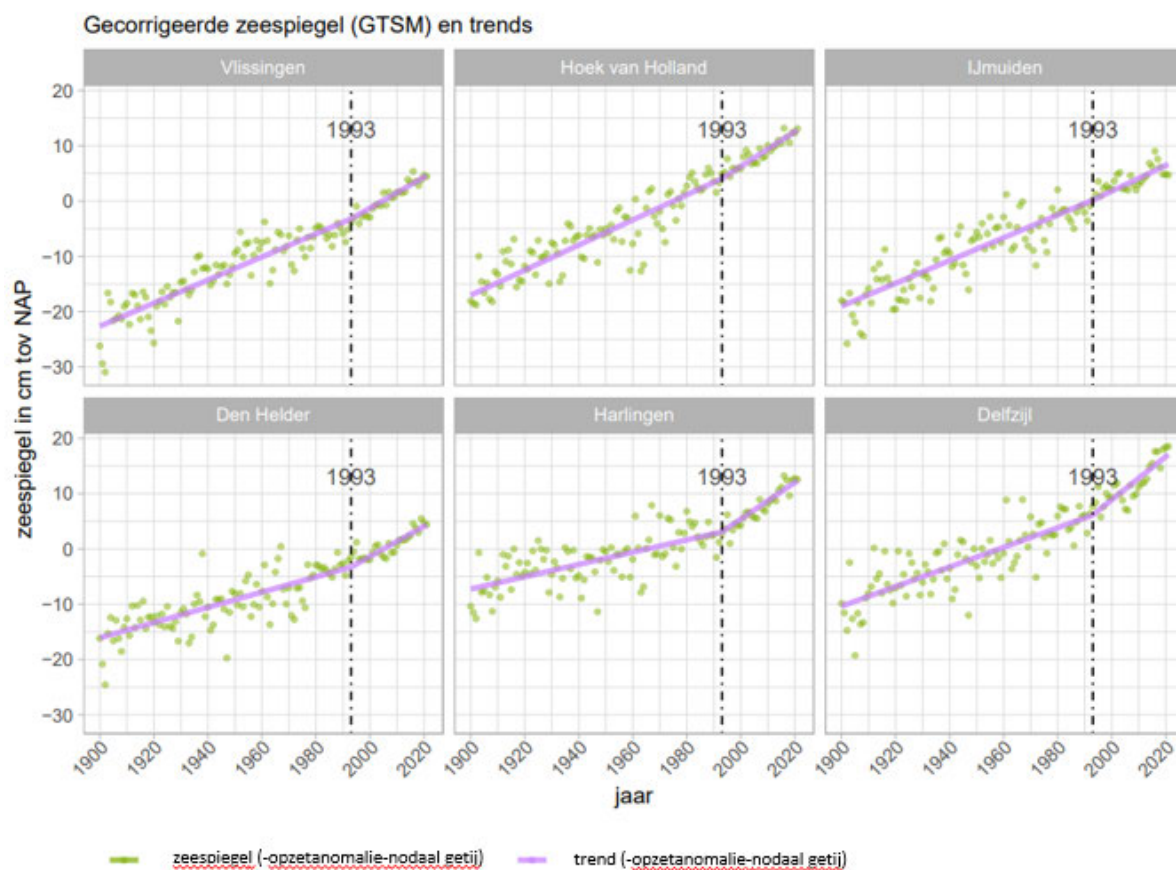
Tabel 3.2 Relatieve zeespiegelstijging voor de zes hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust (in mm/jaar) voor verschillende perioden en verschillende regressiemodellen (Stolte et al., 2023; Steffelbauer et al., 2022).

Periode	Stolte et al. (2023)	Steffelbauer et al. (2022)
	1993-2021 (68% betrouwbaarheidsinterval)	1993-2018 (68% betrouwbaarheidsinterval)
Vlissingen	2.8 ± 0.5	2.9 ± 0.1
Hoek van Holland	3.1 ± 0.5	3.1 ± 0.1
IJmuiden	2.3 ± 0.6	2.2 ± 0.1
Den Helder	2.7 ± 0.4	1.9 ± 0.1
Harlingen	3.3 ± 0.4	3.0 ± 0.1
Delfzijl	3.9 ± 0.5*	3.5 ± 0.1

*Verticale correcties voor waterstanden voor periode 2018-2022 mogelijk nog niet uitgevoerd.

¹⁵ en de absolute zeespiegelstijging circa 2,4 mm/jaar

¹⁶ Het langzaam terugveren van de aardkust sinds het verdwijnen van de ijsmassa's na het laatste glaciële maximum.



Figuur 3.5 Jaargemiddelde zeespiegelstand voor zes hoofdmeetstations ten opzichte van NAP (groen). De paarse lijn toont de zeespiegeltrend volgens het gebroken lineaire model, waarbij gecorrigeerd is voor windopzet (GTSM) en nodaal getij (Stolte et al., 2023). Deze getijddestations leveren sinds 1890, toen het NAP overal was doorgevoerd, zeer volledige metingen. Deze metingen moeten wel met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd, omdat de omstandigheden rondom de stations veranderlijk zijn en ook de locaties van de stations niet altijd optimaal zijn om de zeespiegelstand te meten.

Naast metingen van getijddestations geven ook radarhoogtemetingen van het zeeoppervlak via satellieten informatie over het absolute deel van de zeespiegelstijging (Fig. 3.1). Deze gegevens zijn sinds 1993 ook voor de Waddenzee en Noordzeekust beschikbaar, al kent de verwerking van de metingen in kustgebieden een grotere onnauwkeurigheid dan op open zee (Cipollini et al., 2017). Dat maakt het gebruik van deze gegevens voor het vaststellen van ruimtelijke verschillen complex (Vermeersen et al., 2018; Chafik et al., 2019). Daarom is het (nog) niet mogelijk om uit satellietgegevens de recente zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust af te leiden met de gewenste nauwkeurigheid. In de toekomst kan dit mogelijk wel wanneer voldoende lange meetreeksen van de nieuwste satellieten, zoals ESA Sentinel-3 (sinds 2016), ESA Sentinel-6 (sinds 2020) en NASA SWOT (sinds 2021) beschikbaar zijn. Deze satellieten maken het mogelijk om dicht bij de kust de zeespiegel te meten. Daarnaast, is verder onderzoek nodig naar hoe deze data optimaal gebruikt kan worden.

3.3 Versnelling zeespiegelstijging

3.3.1 Versnelling zeespiegelstijging wereldwijd

Analyses van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging laten zien dat deze aan het versnellen is (Tabel 3.3). Deze versnelling is het gevolg van antropogene invloeden op het klimaat (Oppenheimer et al., 2019) welke leidt tot de opwarming van het klimaat en massaverlies van de Groenlandse ijskap en Antarctische ijskap. Daarnaast spelen het smelten van berggletsjers en thermische expansie van het oceanwater een rol in de versnelling.

Tabel 3.3 Wereldgemiddelde zeespiegelstijging afgeleid voor verschillende perioden (¹Fox-Kemper et al., 2021; ²Frederikse et al., 2020; ³Beckley et al., 2017).

Periode	Wereldgemiddelde zeespiegelstijging [mm/j]
1901-1990	1,35 [0,78-1,92] ¹ (metingen getijdestations)
1901-2018	1,73 [1,28-2,17] ¹ (metingen getijdestations tot 1993, satelliet altimetrie vanaf 1993)
1971-2018	2,33 [1,55-3,12] ¹ (metingen getijdestations tot 1993, satelliet altimetrie vanaf 1993)
1993-2018	3,25 [2,88-3,61] ¹ (satelliet altimetrie) 3,35 [2,91-3,82] ² (metingen getijdestations)
1993-2020	3,34 [2,94-3,74] ³ (satelliet altimetrie)
2006-2018	3,69 [3,21-4,17] ¹ (satelliet altimetrie)

De versnelling van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging neemt langzaam toe en wordt geschat op 0,075 [0,066-0,080] mm/jaar² voor de periode 1971-2018 en op 0,094 [0,082-0,115] mm/jaar² voor de periode 1993-2018 [1-sigmawaarden] (IPCC, 2021).

3.3.2 Versnelling zeespiegelstijging Nederlandse kust

Een versnelling van de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust kan op verschillende manieren worden geschat (Tabel 3.4). Over wanneer de versnelling precies begonnen is (sinds jaren '60 vorige eeuw cf. Keizer et al., 2023 of rond 1993 cf. Steffelbauer et al., 2022; Stolte et al. 2023) en hoe deze verloopt in de tijd bestaat geen consensus onder experts (zie paragraaf 3.2.2).

Tabel 3.4 Versnelling van de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (¹Stolte et al. (2023), ²Steffelbauer et al. (2022), ³Keizer et al. (2023)).

Periode	Versnelling zeespiegelstijging [mm/j]
1890-2021	0,003 ± 0,002 mm/jaar ² (kwadratisch regressiemodel) ¹
1960-2021	0,009 ± 0,004 mm/jaar ² (gebroken kwadratisch regressiemodel) ¹
1960-2018	0,05 mm/jaar ² bij startjaar tussen 1960 en 1970 tot 2018 met getij- en windcorrectie ²
1975-2000	0,05 mm/jaar ² met getij- en windcorrectie ³

Aandachtspunten:

Samenvattend komen uit dit hoofdstuk een aantal aandachtspunten naar voren voor het opstellen van het gevraagde beleidsscenario 2024-2029.

De relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is recent bepaald in meerdere onderzoeken op basis van metingen van getijdestations langs de Nederlandse kust met een aantal methodische verschillen: het aantal meegenomen getijdestations, de correctie voor variaties in getij en windopzet en het toegepaste regressiemodel. Om tot een beleidsscenario 2024-2029 te komen moet worden onderbouwd welke methode de voorkeur heeft en waarom.

Daarbij zijn de volgende punten belangrijk:

- Om meerdere redenen (i.e. aanzienlijke antropogene daling, mogelijk onvolledig uitgevoerde correcties, verhoogde gevoeligheid voor windopzet) staat de betrouwbaarheid van het hoofdmeetstation Delfzijl ter discussie. Onderbouwd moet worden of dit station wordt meegenomen of buiten beschouwing wordt gelaten en waarom.
- In de verschillende studies worden verschillende correcties toegepast voor variaties in getij en windopzet. Aandachtspunt is de onderbouwing van het gebruiken van de windopzetcorrectie voor het beleidsscenario 2024-2029. Hier is in eerdere adviezen verschillend mee omgegaan; in de adviezen uit 2006, 2011 en 2016 is niet gecorrigeerd voor windopzet. Deze correctiemethode was destijds nog niet beschikbaar. In het advies van 2020 is wel gecorrigeerd voor windopzet.
- De gevoeligheid van de relatieve zeespiegelstijging voor het toegepaste regressiemodel. Onderbouwd moet worden welk model de voorkeur heeft en waarom.

Uit de analyse van de temporele variabiliteit (§3.2.1) komen de volgende kennishiaten naar voren:

- De wetenschappelijke kennis over wat de beste methode is om de doorwerking van variaties in zeestromingen, wind en getijden op de lokale zeespiegel te bepalen is nog in ontwikkeling (KNMI, 2023a).

- Voor het bepalen van de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is de (lokale) bodemdaling nabij de meetstations een factor van belang. Hoewel middeling over meerdere getijdstations (Hijma & Kooi, 2018; Hijma, 2022; Stolte et al., 2023) de onzekerheid verkleint, blijft de resterende onzekerheid in het signaal aanzienlijk.

Om tot een beleidsscenario 2024-2029 te komen moet worden onderbouwd hoe de metingen te extrapoleren en waarom, aangezien er geen consensus bestaat over wanneer de versnelling precies begonnen is en hoe deze verloopt in de tijd (§3.3). Dit betreft in het bijzonder de versnellingsterm¹⁷ en correcties voor de randeffecten van de toegepaste middeling¹⁸.

Uit de analyse van de ruimtelijke variabiliteit (§3.2.2) komen daarnaast nog de volgende kennishiaten naar voren:

- De zeespiegel bij de noordelijke meetstations lijkt iets sneller te stijgen dan bij de meer zuidelijke stations (Tabel 3.2, Stolte et al., 2023). Dit verschil kan mogelijk worden verklaard door een verschil in bodemdalingssnelheid veroorzaakt door de glacio-isostatische bodemdaling, welke hoger is in het noorden dan in het zuiden. Echter, de beschouwde dataset is te klein om hierover harde conclusies te kunnen trekken. De extra versnelling bij getijdstation Delfzijl kan mogelijk deels verklaard worden, door het mogelijk achterlopen van de verticale correcties en een grotere invloed van stormvloed op de waterstandsgemiddelden vanwege de ligging in het Eems-estuarium.
- Verschillen in zeespiegelstijging kunnen ontstaan door bodemdaling, kustmorfologie en de aanleg van dijken of dammen (Pickering et al., 2017). In hoeverre kan het feit, dat de Waddenzee is omringd door de Afsluitdijk, het Lauwersmeer en de dijken langs de waddenkust, van invloed zijn op de lange termijn projecties wanneer er een verandering optreedt? Welke lange termijn effecten uit het verleden hebben invloed op de huidige en toekomstige zeespiegelstijging en in welke mate?
De verwachting is dat de invloed hiervan op de huidige zeespiegelstijging beperkt is (zie Wang et al., 2018). Het effect van de afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee op de morfologie van de betreffende Waddenbekkens is inmiddels afgenomen tot nauwelijks nog waarneembaar (Elias & Van der Spek, 2017; Elias & Oost, 2021). Uit de doorgaande sedimentatie langs de randen van de bekkens van de westelijke Waddenzee kan worden afgeleid dat de effecten van de morfologische veranderingen, en eventuele terugkoppelingen op de waterbeweging aanzienlijk kleiner zijn dan de directe effecten van de afsluitingen op de waterbeweging (zie Colina Alonso et al., 2021).
- Echter, dit is (nog) niet expliciet uitgezocht. De reguliere waddenzeedijken liggen op locaties waar in het verleden de opslibbing tot boven hoogwater heeft plaatsgevonden (latere aanpassingen daargelaten). Dat betekent dat de bedijkte delen niet meer morfologisch actief waren en dus ook geen invloed meer konden uitoefenen op de waterbeweging en daarmee op de impact van een stijgend gemiddeld zeeniveau.

¹⁷ In mm/jaar²

¹⁸ Moving window middeling

4 Actualisatie beleidsscenario per 2024

In paragraaf 4.1 worden de belangrijkste uitgangspunten beschreven die de basis vormen om in paragraaf 4.2 het beleidsscenario te formuleren.

4.1 *Uitgangspunten*

De uitgangspunten zijn uitgesplitst naar de mee te nemen meetstations, de trendanalyse-methode (inclusief de gevoeligheid van correctie voor nodaal getij en wind) en de versnelling van de zeespiegelstijging.

Meetstations

Idealiter worden voor de extrapolatie de metingen van alleen de drie hoofdmeetstations langs de Waddenkust gebruikt. Echter, per meetstation moet worden gecorrigeerd voor het natuurlijke bodemdalingssignaal. Als alleen de drie hoofdmeetstations langs de Waddenkust zouden worden meegenomen, worden eventuele onder- en overschattingen, die niet volledig ontrafeld en gekwantificeerd kunnen worden, in deze correctie onvoldoende uitgemiddeld. Voor de keuze, welke meetstations te gebruiken, zijn de volgende overwegingen van belang:

1. de data van meetstation Delfzijl van voor 2018 zijn meegenomen in de Zeespiegelmonitor 2018. Voor de periode daarna is onzeker of een extra correctieslag op de Delfzijl data nodig is¹⁹. Om deze reden zijn de meetdata van Delfzijl in de Zeespiegelmonitor 2022 niet meegenomen;
2. de data van het meetstation Delfzijl laten geen trendbreuk zien rond 2018;
3. uit een gevoeligheidsanalyse van het door Steffelbauer et al. (2022) toegepaste regressiemodel op de tijdreeks van de jaarlijkse gemiddelde zeespiegelstand tot en met 2022 met het empirisch nodaal getij cf. Keizer et al. (2023) met en zonder de gegevens van meetstation Delfzijl, welke voor de onderbouwing van dit advies is uitgevoerd door TU Delft (2023), blijkt een (systematisch) verschil in de berekende trend van 0,1 mm/jaar²⁰. De trend met gegevens van Delfzijl is 0,1 mm/jaar hoger dan zonder gegevens van Delfzijl;
4. de door Keizer et al. (2023) en Steffelbauer et al. (2022) berekende trends, met windcorrectie, respectievelijk gebaseerd op data van zes en acht meetstations, inclusief Delfzijl, komen binnen de foutenmarge overeen met de trend berekend door Stolte et al. (2023), zonder Delfzijl, en met de door TU Delft berekende trend zonder Delfzijl (zie Tabel 3.1). Dit betekent dat de trends met en zonder de meetgegevens van Delfzijl niet veel van elkaar verschillen.

De expertgroep kiest er unaniem voor om Keizer et al. (2023) te volgen in het gebruik van de zes hoofdmeetstations, inclusief Delfzijl. Omdat een systematische fout in het beleidsscenario 2024-2029 niet kan worden uitgesloten kan het beleidsscenario later worden aangepast als de NAP correcties voor Delfzijl bekend zijn.

Versnelling, trendanalyse-methode & correctie voor windopzet

Over wanneer de versnelling in de relatieve zeespiegelstijging begonnen is en hoe deze verloopt in de tijd bestaat geen consensus in de literatuur. Schattingen van de versnelling lopen uiteen (Tabel 3.4). Er is consensus binnen de expertgroep dat de trendanalyse-methode volgens Keizer et al. (2023) op dit moment de beste gepubliceerde methode is, omdat hierbij vooraf geen aannames worden gedaan over de vorm van de zeespiegelstijgingstrend of het moment van de aanvang van een eventuele versnelling (datagedreven, unbiased). Dit in tegenstelling tot Steffelbauer et al. (2022) en Stolte et al. (2023), waarbij de gebruikte methoden uitgaan van een 'knikpunt' die de trend kan beïnvloeden (zie §3.2.1, p. 9).

¹⁹ De nulpaal bij dit getijdestation behoort niet bij het primaire meetnet. Reden hiervoor is dat de gaswinning heeft geresulteerd in onstabiele peilmerken. Delfzijl wordt daarom één keer per 5 jaar alleen met secundaire waterpasmetingen ingemeten. De laatste jaren zijn hoogtewijzingen bij Delfzijl mogelijk niet goed doorgevoerd voor de waterstandsmetingen. Rijkswaterstaat heeft begin 2022 geconstateerd dat een inhaalslag nodig is voor de verticale correctie van de waterstandsmetingen bij Delfzijl (Honingh et al., 2021).

²⁰ Voor de periode met startpunt tussen 1993.9 en 1997.7 tot 2023: 2.9 [2.80-2.91] mm/jaar inclusief meetstation Delfzijl en 2.7 [2.70-2.80] mm/jaar exclusief meetstation Delfzijl.

Argumenten om te corrigeren voor de windopzet volgens het TrNtW-model zijn:

1. de onzekerheidsbandbreedte is het kleinst voor het TrNtW-model;
2. de sterke variatie van de windopzet van jaar tot jaar tot plus of min 3 cm per jaar over een periode van 5 jaar (periode beleidsscenario), wat 10 maal zoveel is als de langjarige trend. De beschikbaarheid van meteorologische data in combinatie met zeespiegelgegevens maakt deze correctie goed mogelijk;
3. het doortrekken van een trend op basis van waarnemingen, waar de windinvloeden in worden meegenomen, is onwenselijk vanwege de chaotische, random variaties van die windinvloeden; dit wordt ook niet voor nodale fluctuaties gedaan. Met andere woorden: we kunnen de windinvloed niet of zeer slecht voorspellen maar weten wel dat als we niet voor de wind corrigeren we impliciet aannemen dat de windinvloed hetzelfde blijft als in de periode waarover de trend is bepaald. Dit is pertinent onjuist vanwege de langjarige fluctuaties in het windveld waarbij het teken van het windeffect ook voor 20-30 jaar gemiddelden om de 20-40 jaar omslaat van positief naar negatief en vice versa;
4. consistent beleid van de Rijksoverheid. De Zeespiegelmonitor 2022 (met windcorrectie) wordt sinds 2023 ook in andere beleidsdossiers gebruikt.

Voor de formulering van het beleidsscenario wordt daarom uitgegaan van de voor windopzet gecorrigeerde waarnemingen. Het is belangrijk om in de toekomst opnieuw naar de windopzet te kijken en de meest recente inzichten hierbij mee te nemen.

4.2 Formulering beleidsscenario

Het beleidsscenario is gebaseerd op het TrNtW-model (§3.2.1), waarbij bij de berekening van de trend een correctie wordt toegepast voor variaties in de zeespiegelstand, die zijn veroorzaakt door nodaal getij en langjarige verschillen in windopzet. Keizer et al. (2023) hebben de voor windopzet gecorrigeerde versnelling bepaald voor de periode 1975-2000 (0.05 mm/jaar^2), omdat na 2000 de stijgsnelheid afvlakt vanwege het incompleet kunnen toepassen van het smoothing-filter en de onzekerheid van de versnelling daarmee sterk toeneemt. Het KNMI verwacht dat de versnelling in de loop der jaren groter wordt en dat daarom de 0.05 mm/jaar^2 toename van de stijgsnelheid eerder te laag dan te hoog is ingeschat.

Argumenten voor deze conservatieve inschatting zijn:

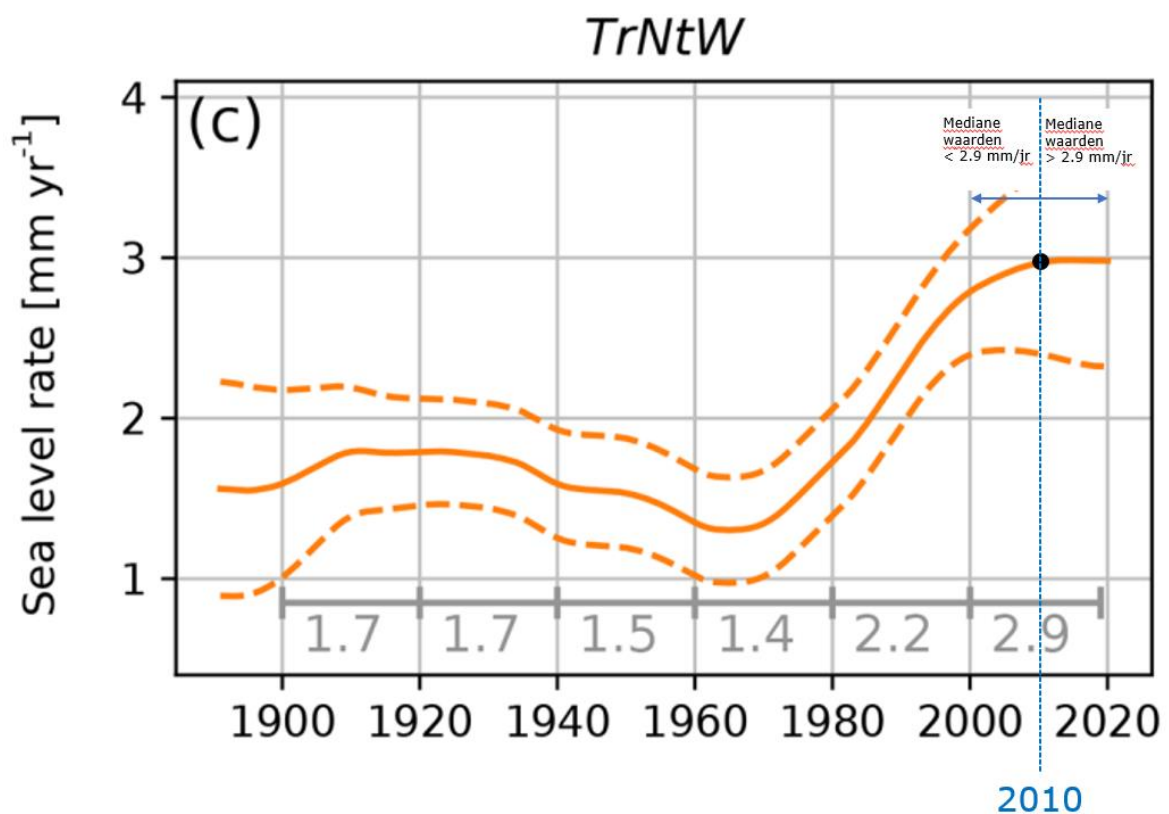
- a) De curve vlt af doordat er een 30-jaar smoothing tijdsfilter is gebruikt, waardoor de laatste 15 punten (jaren) bij een toenemende stijgsnelheid de stijgsnelheid onderschatten.
- b) De meetstations in de Waddenzee laten een sterkere zeespiegelstijgingssnelheid zien dan de Noordzeestations. Omdat we uitgaan van de zes hoofdmeetstations wordt de stijgsnelheid in de Waddenzee nogmaals onderschat.
- c) De windopzet vertoont ook een trend (Fig. 3 in Keizer et al., 2023). Die trend is niet meegenomen in Keizer et al. (2023). Voor het doel van dit advies is het meenemen van die trend een even goede aanneme als het weglaten ervan. Het meenemen van deze trend zou tot een hogere versnelling leiden.

Argumenten om toch te kiezen voor de versnelling van 0.05 mm/jaar^2 zijn dat:

- deze consistent is met de gemiddelde trendverandering volgens Steffelbauer et al. (2022);
- de zeespiegelstijging binnen Hand aan de Kraan minimaal elke 5 jaar opnieuw bekeken wordt;
- elk jaar recente publicaties worden bekeken waarna wordt geconstateerd of een herziening nodig is.

De trend in de zeespiegelstijging berekend door Keizer et al. (2023) voor de periode 2000-2019 bedraagt $2,9 [2,4-3,5] \text{ mm/jaar}$ en geldt als een gemiddelde voor de hele periode. Indien wordt uitgegaan van de aanwezigheid van een versnelling, zoals blijkt uit de data en analyses van Steffelbauer et al. (2022), Keizer et al. (2023) en Stolte et al. (2023), dan geldt de stijgsnelheid uit Keizer et al. (2023) voor het jaar 2010, aannemende dat de versnelling over de periode 2000-2019 constant is (Fig. 4.1). De datareeks die gebruikt is door Keizer et al. (2023) is 'gladgestreken' door toepassing van een 30-jarig tijdsfilter (smoothing), wat ook enigszins tijdschalen langer dan 30 jaar beïnvloed, maar vooral tijdschalen korter dan 30 jaar onderdrukt. Met deze methode wordt voor ieder jaar een gemiddelde zeespiegelstijgingssnelheid bepaald op basis van de jaargemiddelde

snelheid van het jaar hiervoor, het betreffende jaar zelf en het jaar hierna. Door de smoothing is een deel van de ruis, inclusief de extreme waarden, uit de datareeks verwijderd. Omdat Keizer et al. (2023) van langjarige gemiddelden uit willen gaan, zijn 20-jaars gemiddelden van de zeespiegelstijgingssnelheid gebruikt. Omdat de curve waarop de stijgsnelheid is gebaseerd na 2005 duidelijk begint af te vlakken is het aannemelijk dat de stijgsnelheid voor 2000-2019 al een onderschatting is. Verder in de tijd, richting het heden, wordt die onderschatting steeds groter: de stijgsnelheid in 2010 is een gemiddelde van 2000-2019, maar de stijgsnelheid in 2019 zou een gemiddelde van 2009-2019 worden, gebaseerd op een afvlakkende curve. Wij nemen de schatting van de stijgsnelheid voor de periode 2000-2019 daarom als representatief voor 2010. Wij nemen **2010 als startjaar** met een voor windopzet gecorrigeerde zeespiegelstijgingssnelheid van **2,9 [2,4-3,5] mm/jaar**. Wij extrapoleren deze stijgsnelheid vervolgens naar 2024-2029 door toevoeging van een versnelling die we afleiden uit de toename van de 20-jaar gemiddelde stijgsnelheid tussen 1975 en 2000, zoals gepubliceerd door Keizer et al. (2023). Voor de versnelling stoppen we iets eerder dan voor de stijgsnelheid zelf omdat de versnelling veel gevoeliger is voor de afvlakking van de curve die mogelijk ook al voor 2005 enig effect heeft.



Figuur 4.1 De trend in de zeespiegelstijging berekend door Keizer et al. (2023) voor de periode 2000-2019 geldt als een gemiddelde voor deze periode. Indien wordt uitgegaan van de aanwezigheid van een versnelling, dan geldt de stijgsnelheid voor het jaar 2010, aannemende dat de versnelling over de periode 2000-2019 constant is. Door het 'gladstrijken' van de datareeks begint de tijdserie vanaf 2005 en mogelijk al iets eerder af te vlakken, omdat dan meer punten voorafgaand aan het jaar waarop de curve wordt bepaald worden meegenomen dan punten volgend op dat jaar (Keizer et al., 2023).

Het benaderen van een toekomstige zeespiegelstijging middels een trend met een versnelling, die bepaald is uit (een deel van de) meetgegevens van de voorafgaande periode, zal in het geval van een toenemende stijging en versnelling, wat ook de verwachting is voor de zeespiegel langs de Nederlandse kust, altijd leiden tot een onderschatting in de extrapolaties naar de toekomst.

Uitgaande van de gemiddelde zeespiegelsnelheid van 2,9 [2,4-3,5] mm/jaar in 2010 en een gemiddelde jaarlijkse versnelling 0,05 mm/jaar², komt de verwachte relatieve zeespiegelstijging uit op 3,60 [3,10-4,20] mm/jaar voor 2024, toenemend tot 3,85 [3,35-4,45] mm/jaar in 2029. De

jaarlijkse verwachtingswaarden voor de zeespiegelstijging en het 5-95 percentiel (95% betrouwbaarheidsinterval) zijn opgenomen in onderstaande tabel (Tabel 4.1). De expertgroep gaat ervan uit de verwachtingswaarde niet veel afwijkt van de mediane waarde, omdat de scheefheid in de verdeling zeer klein is. Tevens heeft de expertgroep ook niet de beschikking over de volledige kansverdelingsgegevens van Keizer et al. (2023). Daarom is het voor de expertgroep niet mogelijk om de exacte verwachtingswaarde te bepalen. Hiervoor zouden we de programmatuur van Keizer et al. (2023) moeten downloaden en zelf opnieuw de berekeningen moeten maken.

Tabel 4.1 Jaarlijkse verwachtingswaarden van de relatieve zeespiegelstijging van 2024 tot 2029, inclusief de waarden van het 95% betrouwbaarheidsinterval.

Jaar	Snelheid relatieve zeespiegelstijging [mm/j]		
	5% (ondergrens)	50% (mediaan)	95% (bovengrens)
2024	3,10	3,60	4,20
2025	3,15	3,65	4,25
2026	3,20	3,70	4,30
2027	3,25	3,75	4,35
2028	3,30	3,80	4,40
2029	3,35	3,85	4,45

Voor het beleidsscenario 1 januari 2024 – 1 januari 2029 kan de volgende vergelijking voor het bepalen van de verwachtingswaarde worden opgesteld:

Snelheid van relatieve zeespiegelstijging (Z)

$$Z(J) = Z(2010) + (J-2010) * A_1$$

met:

$$Z(2010) = 2,9 \text{ mm/jaar}$$

$$A_1 = 0,05 \text{ mm/jaar}^2$$

De waarden voor Z(J) gelden aan het begin van het kalenderjaar J.

A₁ representeert de versnelling van de zeespiegelstijging.

Verschillen met het advies 2020

De waarden (gemiddeld 3,7 mm/jaar voor de periode 2024-2029) liggen hoger dan in het vorige advies uit 2020 (gemiddeld 2,4 mm/jaar voor de periode 2021-2026), omdat in dit advies voor het beleidsscenario is uitgegaan van:

1. een meer geavanceerd regressiemodel waarbij op voorhand geen aanname wordt gedaan over de aanvang van een eventuele versnelling,
 2. een versnellingsterm (gebruikmakend van windopzetcorrectie) welke is meegenomen in de extrapolatie, en
 3. de tijdreeks van zeespiegelstijgingsobservaties tot 2019 is meegenomen in plaats van tot 2017.
- Het beleidsscenario en de waarden sluiten aan bij de waargenomen trends in getijdestations en satellietobservaties en de recente wereldwijde trends (Tabel 3.3). De waarden liggen lager dan de gemiddelde wereldwijde zeespiegelstijging, zoals verwacht en eerder uitgelegd. De expertgroep verwacht dat toepassing van het gekozen regressiemodel (Keizer et al., 2023) in combinatie met een versnelling meer realistische verwachtingswaarden oplevert.

Verschillen tussen voorgesteld beleidsscenario, Zeespiegelmonitor en advies SodM

Het voorgestelde beleidsscenario komt 0,7-0,9 mm/jaar hoger uit dan de voor de komende jaren geadviseerde trend van 2,9 mm/jaar zonder versnelling uit de Zeespiegelmonitor (Deltares, 2023). Het beleidsscenario gaat uit van een trend van 2,9 mm/jaar, berekend met correctie voor nodaal getij en wind cf. de trend in de Zeespiegelmonitor, in startjaar 2010 met vanaf 2011 een versnelling van 0.05 mm/jaar², terwijl de Zeespiegelmonitor een eventuele versnelling niet meeneemt. Verder zijn de trends die worden geëxtrapolerd om te komen tot het beleidsscenario berekend met een

regressiemodel zonder a priori aanname van een versnelling in plaats van het gebroken trendmodel, zoals in de Zeespiegelmonitor. De toepassing van een ander regressiemodel, het hanteren van startjaar 2010 en een versnelling levert meer realistische verwachtingswaarden op voor dit advies. Nota Bene, er is een discussie gepland tussen Deltares, KNMI en RWS en het Ministerie van I&W om het GAM model (ook) als uitgangspunt voor de Zeespiegelmonitor op te nemen in alle toekomstige versies. Dit zou betekenen dat dit advies en een toekomstige Zeespiegelmonitor dichterbij elkaar komen te liggen.

Het beleidsscenario komt voor de jaren 2024-2025 0,30-0,35 mm/jaar hoger uit dan het scenario zoals geadviseerd door SodM (2022). Beide scenario's zijn gebaseerd op Keizer et al. (2023, met correctie voor nodaal getij en wind). Het verschil is het startjaar, dat voor de bepaling van het beleidsscenario op 2010 is gesteld en het meenemen van een versnellingsterm. Deze keuzes zijn hierboven uitgelegd.

5 Richtscenario vanaf 2029

Het richtscenario ziet verder vooruit dan het beleidsscenario en is opgesteld voor de periode 2029-2050. Dit scenario dient als onderdeel van de 'Hand aan de Kraan' procedures in principe over vijf jaar geactualiseerd te worden op basis van de meest recente wetenschappelijke inzichten. In tegenstelling tot het beleidsscenario, welke bepaald wordt aan de hand van waarnemingen, wordt voor het richtscenario gebruik gemaakt van klimaatmodellen.

5.1 Uitgangspunten

SSP-scenario zeespiegelprojectie

Het uitgangspunt voor het richtscenario vormen de zeespiegelprojecties voor de Nederlandse kust van het KNMI (2023). Deze zeespiegelprojecties zijn geformuleerd op basis van zeespiegelprojecties uit het *Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Fox-Kemper et al., 2021). In het IPCC-rapport zijn verschillende emissiescenario's gedefinieerd gebaseerd op mogelijke ontwikkelingen van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen, als gevolg van plausibele uiteenlopende sociaaleconomische, technologische en demografische ontwikkelingen in de toekomst, de zogeheten *Shared Socio-economic Pathways* (SSP). De SSP-scenario's vormen de basis voor de IPCC zeespiegelprojecties. De IPCC-projecties bevatten sterische en dynamische veranderingen in de oceaan, veranderingen in de ijskap- en gletsjermassa's, grondwaterwinning en atmosferische drukverandering.

Het KNMI heeft de IPCC-projecties toegespitst op de Nederlandse kust. De belangrijkste aspecten hiervan zijn (zie ook Dorland et al., 2023, p. 163):

1) De zeespiegelscenario's zijn zo ontwikkeld dat ze overlappen met de waarnemingen van de zeespiegelstand en de gekwantificeerde bijdrage van de afzonderlijke factoren aan de zeespiegelstijging (smelten ijskap Antarctica, oceaan-dynamische zeespiegel) in de periode 1993-2021 (Fig. 5.1). Er wordt hierbij uitgegaan van een gesloten zeespiegelbudget (cf. Frederikse et al., 2016, 2020). In het zeespiegelbudget wordt de som van de afzonderlijke componenten die bijdragen aan de zeespiegelstijging, zoals thermische uitzetting van oceaanwater en smeltwater van gletsjers, vergeleken met de waargenomen zeespiegelstijging. Om de modeluitkomsten te kunnen vergelijken met waarnemingen starten de KNMI'23-scenario's in 1995.

2) Omdat de klimaatmodellen de neiging hebben zeespiegelveranderingen aan onze kust ten gevolge van veranderingen in zeestromen en warm/koud en zout/zoet waterverdeling te overschatten voor de periode 1993-2021 is modelselectie toegepast waarbij alleen die modellen zijn meegenomen waarvan de trend plus onzekerheid in deze term overlapt met de trend plus onzekerheid van dezelfde term in de waarnemingen, waarbij de effecten van nodaal getij en windinvloed in modellen en waarnemingen zijn afgetrokken.

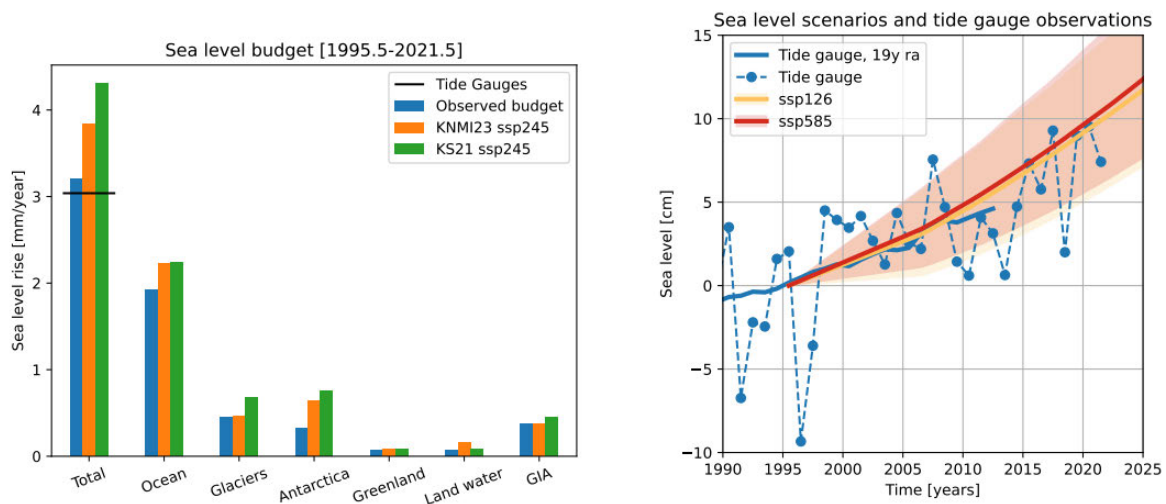
3) De wereldgemiddelde temperatuurverandering in de scenario's is niet langer vastgezet op een richtwaarde, zoals in KNMI'14, maar de mediaan en spreiding daarin zijn overgenomen uit het IPCC Rapport. Hierdoor is de onzekerheid in temperatuur gegeven een bepaald emissiescenario nu ook meegenomen in de onzekerheidsmarges.

4) Verder bevatten de KNMI'23 zeespiegelprojecties de verticale beweging van het land als gevolg van terugveren van de aardkorst in trage reactie op het wegsmelten van het landijs van de laatste ijstijd dat toen net ten noorden van Nederland lag en neemt daarvoor dezelfde waarde aan als de zeespiegelmonitor (0.45 mm/jaar) en dit advies.

5) Het smelten van landijs of het verplaatsen van grondwater van land naar zee verandert het zwaartekrachtsveld op aarde dat van plaats naar plaats kleine variaties kent. Daardoor verandert ook het vlak van een zeespiegel in rust. Hierdoor wordt het smeltwater van smeltend landijs ongelijk verdeeld over de wereldzee en leidt tot sterke lokale verschillen in zeespiegelstijging.

De KNMI'23 zeespiegelprojecties voor de Nederlandse kust zijn bepaald voor drie SSP-scenario's; SSP1-2.6, SSP2-4.5 en SSP5-8.5. Het SSP1-2.6 scenario gaat uit van een waarschijnlijke temperatuurstijging van minder dan 2 graden aan het eind van deze eeuw, conform het klimaatakkoord van Parijs. Het SSP5-8.5 scenario gaat ervan uit dat er geen maatregelen worden genomen om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen en dat de uitstoot verder toeneemt tot 2090, met een verdubbeling van de uitstoot in 2050. Echter, in de praktijk worden er al maatregelen

genomen om de uitstoot te verminderen. Daarom lijkt het op dit moment het meest waarschijnlijk dat de toekomstige broeikasgasconcentraties lager zullen uitvallen dan in het SSP5-8.5 scenario en ergens tussen die van het SSP1-2.6 en het SSP5-8.5 scenario komen te liggen (KNMI, 2023). Gelet op het doel en de toepassing van dit advies is het nodig om één SSP-scenario te selecteren voor de formulering van het richtscenario. Daarbij moet worden aangetekend dat op de korte termijn (de komende decennia) de verschillen tussen SSP-scenario's voor zeespiegelstijging relatief klein zijn, maar dat de afhankelijkheid van het SSP-scenario groeit richting het eind van deze eeuw en daarna (Fox-Kemper et al., 2021). Het SSP2-4.5 is een gematigd scenario waarin wordt verondersteld dat er beleid tot stand komt en wordt uitgevoerd waardoor de uitstoot van broeikasgassen wordt beperkt. Dat is op dit moment het geval. Daarnaast wijzen verschillende analyses (Wang et al., 2018; Salawitch et al., 2019; Hausfather & Peters, 2020, climate action tracker website) erop dat het SSP2-4.5-scenario goed past bij de beleidstoezeggingen die momenteel zijn gedaan. Echter, daarbij moet worden opgemerkt dat er nog steeds een grote mismatch is tussen beleidstoezeggingen en daadwerkelijk geïmplementeerde maatregelen (Wang et al., 2018; Rogelj et al., 2019; Schwalm et al., 2020). Het recente Adaptation Gap Report van het UN Environment Programme stelt dan ook dat de wereld momenteel afstevent op 2.7 graden opwarming in 2100, wat consistent is met het SSP2-4.5-scenario. **Dit leidt tot de selectie van het SSP2-4.5-scenario voor het richtscenario.**



Figuur 5.1 Links: waargenomen en gemodelleerde zeespiegelstijgingssnelheid langs de Nederlandse kust voor de periode 1995-2021 met een kwantificering van de bijdrage van de afzonderlijke factoren. Het label 'KS21' staat voor Klimaatsignaal'21 gemeten bijdrage aan de zeespiegelstijging zeespiegelbudget. Rechts: tijdreeks van waargenomen zeespiegelstijging (blauw) en KNMI'23 scenario's (rood, geel) voor de Nederlandse kust voor de periode 1995-2025. Waarnemingen van getijdstations zijn weergegeven als jaarlijkse gemiddelden (blauwe punten en stippellijn) en het 19-jarig voortschrijdend gemiddelde (blauwe doorgetrokken lijn). De scenario's overlappen met de waarnemingen van de jaarlijks gemiddelde zeespiegelstand in de periode 1995-2021 (Dorland et al., 2023).

Snelheid relatieve zeespiegelstijging voor SSP2-4.5-scenario in 2050

De mediane waarde voor de zeespiegelstijgingssnelheid in het jaar 2050 voor het SSP2-4.5-scenario bedraagt 6,8 mm/jaar. Waarschijnlijk (17-83%) ligt de waarde voor 2050 tussen 5,6 en 8,5 mm/jaar en zeer waarschijnlijk (5-95%) ligt de waarde tussen 5,0 en 10,8 mm/jaar (Tabel 5.1). Hieruit blijkt dat er een enigszins scheve mate van onzekerheid is voor de toekomstige ontwikkeling van de zeespiegelstand, als gevolg van de spreiding in de resultaten van verschillende klimaatmodellen en onderliggende procesmodellen van bijvoorbeeld de ijskapingbijdragen.

Tabel 5.1 Snelheid relatieve zeespiegelstijging voor het SSP2-4.5 scenario voor het jaar 2050 voor de Nederlandse kust. Gecorrigeerd voor natuurlijke variabiliteit door wind en nodaal getij en uitgaand van een natuurlijke bodemdalingscomponent van 0,45 mm/jaar. Het betrouwbaarheidsinterval van de projectie is weergegeven met de 17-83% range (de waarschijnlijke waarde) en de 5-95% range (de zeer waarschijnlijke waarde) (bron: KNMI).

Jaar	Snelheid relatieve zeespiegelstijging [mm/j]				
	5% (ondergrens)	17%	50% (mediaan)	83%	95% (bovengrens)
2050	5,0	5,6	6,8	8,5	10,8

Voor het richtscenario wordt geadviseerd om voor 2050 van de mediane zeespiegelstijgingsnelheid uit te gaan, zoals weergegeven in Tabel 5.1, waarbij moet worden opgemerkt dat de waarde met zeer waarschijnlijke zekerheid tussen het 5% en 95% percentiel zal liggen.

Aansluiting van het richtscenario op het beleidsscenario

In vorige adviezen is altijd uitgegaan van IPCC/KNMI projecties voor het richtscenario van de relatieve zeespiegelstijging, zonder een aansluiting te verwachten tussen het beleidsscenario en het richtscenario voor de tussenliggende jaren. Voor dit advies heeft het Ministerie aangegeven dat het wenselijk is om het beleids- en richtscenario op elkaar aan te laten sluiten ten behoeve van het 'Hand aan de Kraan' beleid.

De mediane stijgingsnelheid in 2029 op basis van de extrapolatie van de trend van de voor windopzet gecorrigeerde jaargemiddelde zeespiegelstand gebaseerd op waarnemingen bedraagt 3,85 [3,25-4,45] mm/jaar. De mediane stijgingsnelheid op basis van de klimaatprojectie (KNMI, 2023, SSP2-4.5 scenario), zonder aansluiting op het beleidsscenario, in 2029 bedraagt 5,8 [4,5.-7,6] mm/jaar. De mediaan van het richtscenario is daarmee 2,95 mm/jaar hoger dan die van het beleidsscenario. Dit verschil tussen waarneming en projectie kan als volgt worden verklaard. Lokaal kennen de waarnemingen een grote variabiliteit in de jaargemiddelde relatieve zeespiegelmetingen wanneer korte periodes worden beschouwd. Ter illustratie, de meetreeks van het meetstation Den Helder over de periode 1890-2017 waar de trend van de zeespiegelstijging uit is gehaald, laat een jaar tot jaar variatie zien met een gemiddelde zeespiegelstand van 0,2 cm en een sterk uiteenlopende onder- en bovengrens van het 5-95% betrouwbaarheidsinterval van respectievelijk -5,9 en 4,8 cm (Baart et al., 2019). Over dezelfde periode variëren de 20-jaar gemiddelde stijgingsnelheden voor meetstation Den Helder van -1 tot 7 mm/jaar bij een gemiddelde van 2 mm/jaar. De trend voor de periode 1993-2017 is bijvoorbeeld 2,4 mm/jaar met 0,9 en 3,9 mm/jaar als waarde voor respectievelijk de onder- en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval (5 en 95 percentiel). In de volgende 24 jaar is het vanuit fysisch en statistisch perspectief goed mogelijk dat deze waarden flink (5 mm/jaar) hoger liggen. Zij verder opgemerkt dat projecties en waarnemingen een 19-jaar gemiddelde stijgsnelheid vertonen die voor de periode 2001-2013 goed overeenkomt (Figuur 5.1), maar als we naar jaarlijks gemiddelden kijken neemt de stijgsnelheid na 2010 in de modellen veel sneller toe dan de 0.05 mm/jaar² die voor de periode 1975-2000 uit de waarnemingen is bepaald (Keizer et al., 2023). Een recentere update van die versnelling kon door de te korte tijdreeksen niet gegeven worden.

Ondanks dat de verschillen tussen de projecties en de waarnemingen goed te duiden zijn, is het niet mogelijk om de relatieve bijdragen aan het verschil te kwantificeren, omdat het achterblijven van de geobserveerde stijgingsnelheid door natuurlijke processen moeilijk te voorspellen is.

Om het richtscenario op het beleidsscenario aan te laten sluiten, worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. de mediane stijgingsnelheid in 2029 op basis van de extrapolatie van de trend van de jaargemiddelde zeespiegelstand gebaseerd op waarnemingen bedraagt 3,85 mm/jaar;
2. de mediane stijgingsnelheid op basis van de klimaatprojectie (KNMI, 2023, SSP2-4.5 scenario) in 2050 bedraagt 6,8 mm/jaar.
3. de versnelling bedraagt minimaal 0,05 mm/jaar² en neemt naar verwachting verder toe.

5.2 Formulering van het richtscenario

Om het richtscenario aan te laten sluiten op het beleidsscenario, adviseert de expertgroep uit te gaan van de verwachtingswaarde voor de zeespiegelstijgingsnelheid in 2029 volgens het beleidsscenario en de mediane waarde van 6,8 mm/jaar in 2050 cf. de zeespiegelprojectie voor het SSP2-4.5-scenario. In verband met de grote onzekerheid in de voorspelling adviseert de expertgroep de mediane waarde te hanteren als verwachtingswaarde. De jaarlijkse versnelling wordt berekend aan de hand van het verschil in zeespiegelstijgingsnelheid tussen het beleidsscenario in 2029 en richtscenario in 2050 welke moet worden overbrugd in 21 jaar tijd, en komt met een lineaire interpolatie uit op een jaarlijkse versnelling van 0,140 mm/jaar². Net als in voorgaande adviezen wordt een lineaire interpolatie toegepast. Reden hiervoor is dat het verloop van de zeespiegelstijging in de toekomst onbekend is en het richtscenario niet overeenkomt met de fysische werkelijkheid. Met het doen van meer aannames worden extra fouten geïntroduceerd, daarom is ervoor gekozen om een zo eenvoudig mogelijke interpolatie uit te voeren. Ook het 5- en 95-percentiel zijn bepaald door lineaire interpolatie. Het 5- en 95-percentiel voor de verwachtingswaarde in 2029 en in 2050 zijn hierbij genomen als uitgangspunt.

Een grotere versnelling voor het richtscenario wordt door de expertgroep aannemelijk geacht, omdat de toename in stijgsnelheid in de periode 2029-2050 waarschijnlijk groter zal zijn dan de versnelling zoals gehanteerd in het beleidsscenario.

Voor het richtscenario van 2024 tot 2050 kan de volgende vergelijking voor het bepalen van de verwachtingswaarde worden opgesteld:

Snelheid van relatieve zeespiegelstijging (Z)

$$Z(J) = Z(2029) + (J-2029) * A_2$$

met:

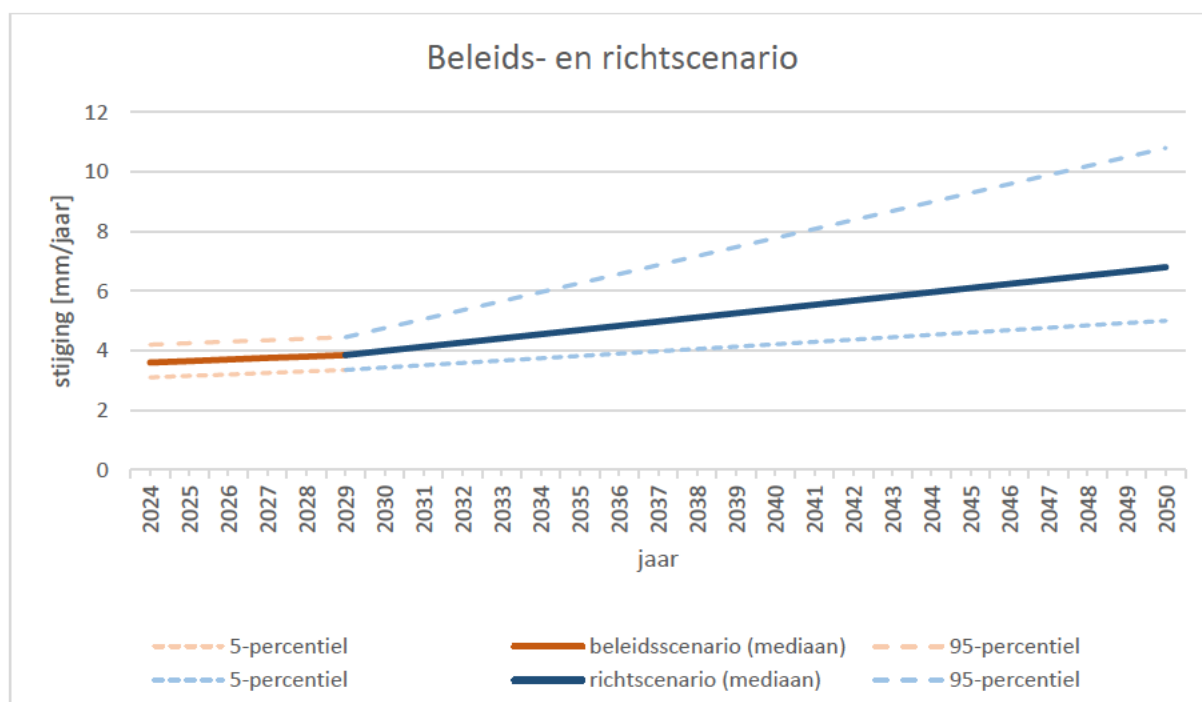
$$Z(2029) = 3,85 \text{ mm/jaar}$$

$$A_2 = 0,140 \text{ mm/jaar}^2$$

De waarden voor Z(J) gelden aan het begin van het kalenderjaar J.

A₂ representeert de versnelling van de zeespiegelstijging.

Het richt- en beleidsscenario zijn gevisualiseerd in onderstaande figuur.



Figuur 5.2 Het richtscenario aansluitend op het beleidsscenario.

6 Advies

De technische evaluatie (zie bijlage) leidt tot de volgende formulering van het geadviseerde beleidsscenario per 1 januari 2024 en richtscenario per 1 januari 2029 voor de relatieve zeespiegelstijging, inclusief natuurlijke en exclusief antropogene bodemdaling:

Beleids­scenario 1 januari 2024 – 1 januari 2029

Snelheid van relatieve zeespiegelstijging (Z)

$$Z(J) = Z(2010) + (J-2010) * A_1$$

met:

$$Z(2010) = 2,9 \text{ mm/jaar}$$

$$A_1 = 0,05 \text{ mm/jaar}^2$$

De waarden voor Z(J) gelden aan het begin van het kalenderjaar J.

A₁ representeert de versnelling van de zeespiegelstijging.

In het beleidsscenario neemt de zeespiegelstijgingssnelheid toe van 3,60 [3,10-4,20]²¹ mm/jaar in 2024 tot 3,85 [3,35-4,45] mm/jaar in 2029 met een verwachtingswaarde volgens bovenstaande vergelijking.

Richtscenario 1 januari 2029 – 2050

$$Z(J) = Z(2029) + (J-2029) * A_2$$

met:

$$Z(2029) = 3,85 \text{ mm/jaar}$$

$$A_2 = 0,140 \text{ mm/jaar}^2$$

De waarden voor Z(J) gelden aan het begin van het kalenderjaar J.

A₂ representeert de versnelling van de zeespiegelstijging.

In het richtscenario neemt de zeespiegelstijgingssnelheid toe van 3,85 [3,35-4,45] mm/jaar in 2029 tot 6,8 [5,0-10,8] mm/jaar in 2050 met een jaarlijkse verwachtingswaarde volgens bovenstaande vergelijking. Het richtscenario sluit aan op het beleidsscenario.

Aandachtspunten voor de toekomst

Bij dit advies willen we een aantal aandachtspunten meegeven voor de toekomst. Deze aandachtspunten zijn aanbevelingen om mee te nemen in volgende adviezen.

1. Sinds 2014 wordt in de Zeespiegelmonitor voorgesteld om windcorrectie toe te passen op de tijdreeks voor de zes hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust. Sinds 2016 wordt dit als voorkeursmethode standaard toegepast. Ook in de internationale peer-reviewed literatuur wordt deze methode al beschreven sinds 2014²². In ons advies passen wij dezelfde methode toe als gebruikt in de Zeespiegelmonitor om trend en versnelling over de afgelopen periode (2000-2019) te bepalen. Nieuw is dat wij de op deze manier bepaalde versnelling over de periode 1975-2000 meenemen in de extrapolatie naar het beleidsscenario. Wij willen benadrukken dat de methode om van waarnemingen uit het verleden trend en versnelling te extrapoleren naar een beleidsscenario niet eenduidig is en dat het belangrijk is om de wetenschappelijke discussie te blijven voeren over hoe de waargenomen trend en versnelling te extrapoleren naar het te actualiseren beleidsscenario.
2. Het beleids- en richtscenario voor de zeespiegelstijging in de Waddenzee zijn gebaseerd op (gecorrigeerde) waterstandswaarnemingen en KNMI-scenario's geldend voor de gehele kust van Nederland (en dus niet specifiek voor de Waddenzee). Door meetgegevens van meer meetstations te gebruiken zijn de daaruit afgeleide trends robuuster. Tevens zijn

²¹ [5 percentiel-95 percentiel]

²² Dangendorf et al. 2014a, 2014b

toekomstscenario's specifiek voor de Waddenzee momenteel niet beschikbaar. Waarnemingen van de stations langs de Waddenzee in de laatste ca. 30 jaar laten een snellere zeespiegelstijging zien dan voor de stations langs de Noordzeekust. Voor dat verschil bestaan op dit moment hypothesen, maar nog geen sluitende verklaringen. Mocht deze trend in Waddenzee ten opzichte van Noordzeekust in de toekomst doorzetten, dan beveelt de expertgroep aan om specifieke Waddenzee-scenario's te ontwikkelen; wat alleen kan als de oorzaken voor de verschillende trends in de Waddenzee en de Noordzee beter worden begrepen. De expertgroep verzoekt daarom het ministerie om lopend onderzoek hiernaar te steunen.

3. De vertaling van de IPCC-projecties naar de Nederlandse kust in de KNMI-klimaatprojecties van het richtscenario sluit niet aan bij het beleidsscenario. Dit komt omdat in de KNMI- (en IPCC-) modellen de stijgsnelheid sneller toeneemt na 2010 dan in de individuele waarnemingen.

Relatie met vorige advies en recente publicaties

Dit advies geeft een basis op grond waarvan de overheid de gebruiksruimte voor de periode 2024-2029 kan vaststellen. De waarden van het beleidsscenario liggen hoger dan in het vorige advies uit 2020 (gemiddeld 2,4 mm/jaar voor de periode 2021-2026), de waarden van het SodM-advies uit 2022 (gemiddeld 3,3 mm/jaar voor de periode 2021-2026) en de waarden uit de Zeespiegelmonitor uit 2023 (gemiddeld 2,9 mm/jaar voor de periode 1993-2022). De afwijking ten opzichte van het vorige advies komt met name door (1) het gebruik van een meer geavanceerd regressiemodel waarbij op voorhand geen aanname wordt gedaan over de aanvang en mate van een eventuele versnelling, (2) het gebruik van een versnellingsterm en (3) door de toevoeging van recentere waarnemingen.

In hierboven genoemde adviezen en de Zeespiegelmonitor is de trend over de afgelopen periode (ca. 1993-tot eind meetperiode) constant gehouden en is dezelfde waarde gebruikt voor de beleidsadviesperiode. In het voorliggende advies is de trend die wij als uitgangspunt genomen hebben consistent met vorige adviezen maar is een versnellingsterm erbij opgeteld om te extrapoleren naar de beleidsadviesperiode (2024-2029).

Het beleidsscenario sluit nog steeds aan bij de waargenomen trends in getijdestations (na windopzetcorrectie) en satellietobservaties en de recente wereldwijde trends (zie bijlage: Tabel 3.3).

7 Referenties

- Advies, 2020. Advies beleids- en richtscenario relatieve zeespiegelstijging Waddenzee 2021-2050, 18 december 2020.
- Advies, 2022. Advies inzake bijstelling beleids- en richtscenario relatieve zeespiegelstijging Waddenzee, 16 mei 2022 <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-5c6f6806a4a3b2efbc042b02087a554cf09e3682/pdf>
- Baart, F., R. Leander, J.G. de Ronde, H. de Vries, V. Vuik, R. Nicolai, 2015. Zeespiegelmonitor 2014 – Rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging. Deltares, rapport 1209426-000-VEB-0007.
- Baart F., G. Rongen, M. Hijma, H. Kooi, R. de Winter, R. Nicolai, 2019. Zeespiegelmonitor 2018 – De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Deltares, rapport 11202193-000-ZKS-0004.
- Chafik, L., J.E.Ø. Nilsen, S. Dangendorf, G. Reverdin, T. Frederikse, 2019. North Atlantic Ocean circulation and decadal sea level change during the altimetry era. *Scientific Reports*, 9(1), 1041.
- Church, J.A., N.J. White, 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602. <https://doi.org/10.1029/2005GL024826>.
- Church, J.A., N.J. White, 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 20st century. *Surv. Geophys*, 32, 585-602.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer, A.S. Unnikrishnan, 2013. Sea Level Change. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds). *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press (Cambridge): 1137–1216.
- Cipollini, P., F.M. Calafat, S. Jevrejeva, A. Melet, P. Prandi, 2017. Monitoring sea level in the coastal zone with satellite altimetry and tide gauges. *Surveys in Geophysics*, 38, 33-57.
- Colina Alonso, A., D.S. van Maren, E.P.L. Elias, S.J. Holthuisen, Z.B. Wang, 2021, The contribution of sand and mud to infilling of tidal basins in response to a closure dam. *Marine Geology*, 439, 106544. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106544>.
- Dangendorf, S., F.M. Calafat, A. Arns, T. Wahl, I.D. Haigh, J. Jensen, 2014a. Mean sea level variability in the North Sea: Processes and implications, *J. Geophys. Res.-Ocean.*, 119, 6820–6841. <https://doi.org/10.1002/2014JC009901>.
- Dangendorf, S., T. Wahl, E. Nilson, B. Klein, J. Jensen, 2014b. A new atmospheric proxy for sea level variability in the southeastern North Sea: observations and future ensemble projections, *Clim. Dynam.*, 43, 447–467. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1932-4>.
- Dangendorf, S., C. Hay, F.M. Calafat, M. Marcos, C.G. Piecuch, K. Berk, J. Jensen, 2019. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Communications*, 9, 705–710. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>.
- Dangendorf, S., T. Frederikse, L. Chafik, J.M. Klinck, T. Ezer, B.D. Hamlington, 2021. Data-driven reconstruction reveals large-scale ocean circulation control on coastal sea level, *Nat. Clim. Change*, 11, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01046-1>.
- De Ronde, J.G., F. Baart, C.A. Katsman, V. Vuik, 2014. Zeespiegelmonitor. Deltares, rapport 1208712-000-ZKS-0010.
- DeConto, R., D. Pollard, 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531, 591–597. <https://doi.org/10.1038/nature17145>.
- Deltares, 2023. [Zeespiegel Nederlandse kust verder gestegen in 2022 | Deltares website.](#)

- Dillingh, D., F. Baart, J.G. de Ronde, 2010. Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament. Deltares, rapport 1201993-002-VEB-0003.
- Dorland, R., van, J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink, M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Groenland, R. Haarsma, C. Homan, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, B. Overbeek, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, C. de Valk, P. van Velthoven, H. de Vries, M. van Weele, B. Wichers Schreur, K. van der Wiel, 2023. KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. Scientific report. KNMI, 374 p.
- Elias, E., A. Oost, 2021. Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Een conceptueel model. Deltares, rapport 11205236-003-ZKS-0005.
- Elias, E.P.L., A.J.F van der Spek, 2017. Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. *Netherlands Journal of Geosciences*, 96-4, 293-317. <https://doi.org/10.1017/njg.2017.34>.
- Frederikse, T., R. Riva, M. Kleinherenbrink, Y. Wada, M. van den Broeke, B. Marzeion, 2016. Closing the sea level budget on a regional scale: Trends and variability on the Northwestern European continental shelf. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (20), 10864-10872. <https://doi.org/10.1002/2016GL070750>.
- Frederikse, T., T. Gerkema, 2018. Multi-decadal variability in seasonal mean sea level along the North Sea coast, *Ocean Sci.*, 14, 1491–1501. <https://doi.org/10.5194/os-14-1491-2018>, 2018.
- Frederikse, T., F. Landerer, L. Caron, S. Adhikari, D. Parkes, V.W. Humphrey, S. Dangendorf, P. Hogarth, L. Zanne, L. Cheng, Y.-H. Wu, 2020. The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, 584, 393–397. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–72.
- Keizer, I., D. Le Bars, C. de Valk, A. Jüling, R. van de Wal, S. Drijfhout, 2023. The acceleration of sea-level rise along the coast of the Netherlands started in the 1960s. *Ocean Science*, 19(4), 991-1007. <https://doi.org/10.5194/os-19-991-2023>.
- Hausfather Z., G.P. Peters, 2020. Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature*, 557, 618-620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>.
- Hijma, M., H. Kooi, 2018. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens – Door geologische processen en menselijke activiteiten. Deltares, rapport 11200538-008-ZKS-0001.
- Honingh, D., J. Leenders, B. Strijker, 2021. Werkwijze inmeten zeespiegelstand hoofdgetijdenstations. Lelystad: HKV.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Hurk, van den, B., T. Geertsema, 2020. Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust en de regionale bestuurlijke consequenties. Deltares, rapport 11204868-002-ZWS-0001.
- KNMI, 2023a. Website: [KNMI - Zeespiegelstijging](#)
- Ministerie van Economische Zaken, 2006. Gaswinning binnen randvoorwaarden. Passende beoordeling van het Rijksprojectbesluit over aardgaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.

- Muis, S., M. I. Apecechea, J. Dullaart, J. de Lima Rego, K. Skovgaard Madsen, J. Su, K. Yan, M. Verlaan, 2020. A High-Resolution Global Dataset of Extreme Sea Levels, Tides, and Storm Surges, Including Future Projections. *Frontiers in Marine Science* 7 (April): 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>.
- Muis, S., M. Verlaan, H. C. Winsemius, Ph. J. Ward, J.C.J.H. Aerts. 2016. A Global Reanalysis of Storm Surges and Extreme Sea Levels. *Nature Communications, Articles* 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms11969>.
- NASA, 2023a. Sea level change. Observations from space. Understanding sea level. [Global Mean Sea Level | Key Indicators – NASA Sea Level Change Portal](#)
- NASA, 2023b. [New study finds sea level rise accelerating – Climate Change: Vital Signs of the Planet \(nasa.gov\)](#)
- Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac, Z. Sebesvari, 2019. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- Pickering, M.D., K.J. Horsburgh, J.R. Blundell, J.J.-M. Hirschi, R.J. Nicholls, M. Verlaan, N.C. Wells, 2017. The impact of future sea-level rise on the global tides. *Continental Shelf Research* 142, 50–68. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.02.004>.
- Rogelj, J., D. Huppmann, V. Krey, K. Riahi, L. Clarke, M. Gidden, Z. Nicholls, M. Meinshausen, 2019. A new scenario logic for the Paris Agreement long-term temperature goal. *Nature* 573, 357–363. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1541-4>.
- Salawitch, R.J., T.P. Canty, A.P. Hope, W.R. Tribett, B.F. Bennet, 2017. Paris Climate Agreement: A Beacon of Hope. *Springer Climate*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46939-3>.
- Schwalm, C.R., S. Glendon, P.B. Duffy, 2020. RCP8.5 track cumulative CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (33), 19656–19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>.
- Steffelbauer, D.B., R. E. Riva, J.S. Timmermans, J.H. Kwakkel, M. Bakker, 2022. Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea. *Environmental Research Letters*, 17(7), 074002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac753a>.
- Stolte, W., F. Baart, S. Muis, M. Hijma, M. Taal, D. Le Bars, S. Drijfhout, 2023. Zeespiegelmonitor 2022. Deltares, rapport 11209266-000-ZKS-0001.
- TNO, 2011. Actualisatie beleidsscenario zeespiegelstijging voor bepaling gebruiksruimte voor gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. TNO AGE, 11-10.044.
- TNO, 2016. Actualisering beleidsscenario zeespiegelstijging voor delfstofwinning onder de Waddenzee, TNO AGE, 16-10.066.
- United Nations Environment Programme (2023). *Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed.* Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43796>.
- Vermeersen, B., A. Slangen, T. Gerkema, F. Baart, K. Cohen, S. Dangendorf, ... M. Van der Wegen, 2018. Sea-level change in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97 (3), 79–127. <https://doi.org/10.1017/njg.2018.7>.
- Waal, de, J., Roest, J., Fokker, P., Kroon, I., Breunese, J., A.G. Muntendam-Bos, ... Van Wirdum, G. (2012). The effective subsidence capacity concept: How to assure that subsidence in the Wadden Sea remains within defined limits? *Netherlands Journal of Geosciences*, 91(3), 385–399. <https://doi.org/10.1017/S0016774600000512>.

Wang F., Q. Ge, D. Chen, J. Luterbacher, K.B. Tokarska, Z. Hao, 2018. Global and regional climate responses to national-committed emission reductions under the Paris agreement. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100 (3), 240-253. <https://doi.org/10.1080/04353676.2018.1488538>.

Wang, Z.B., E.P.L. Elias, A.J.F van der Spek, Q.L. Lodder, 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97-3, 183-214. <https://doi.org/10.1017/njg.2018.8>.