

Bijlage: onderbouwing advies

1 Inleiding

Dit advies over de relatieve zeespiegelstijging is opgesteld ten behoeve van de vaststelling van de gebruiksruimte voor delfstofwinning onder de Waddenzee volgens het 'Hand aan de Kraan' principe zoals geformuleerd in de Passende Beoordeling (PB)¹. Centraal in de PB staat dat gaswinning geen schade mag veroorzaken aan de natuurwaarden van het Waddengebied. Het Waddengebied, dat verschillende kombergingen bevat, wordt daarom aan de hand van een aantal parameters gemonitord. Het begrip 'meegroeivermogen' is geïntroduceerd als een maat voor de draagkracht van individuele kombergingen tegen het tempo van relatieve zeespiegelstijging. Relatieve zeespiegelstijging is de optelsom van 1) het effect van autonome processen (absolute zeespiegelstijging en bodembeweging) en 2) bodemdaling ten gevolge van delfstofwinning. Daarnaast is het begrip 'gebruiksruimte' geïntroduceerd. De gebruiksruimte is gelijk aan het meegroeivermogen minus de autonome relatieve zeespiegelstijging. De belasting door bodemdaling ten gevolge van delfstofwinning dient binnen de gebruiksruimte te vallen.

De relatieve zeespiegelstijging ten gevolge van autonome processen is het onderwerp van dit advies. De zeespiegel in de Waddenzee is aan het stijgen, maar er is onzekerheid over de snelheid waarmee dit gebeurt. Daarom worden de nieuwste inzichten rondom de ontwikkeling van de zeespiegelstijging iedere vijf jaar beschouwd en opgenomen in twee scenario's voor de relatieve zeespiegelstijging in de Waddenzee.

Het eerste scenario is het 'beleidsscenario' voor de relatieve zeespiegelstijging voor delfstofwinning onder de Waddenzee. Dit scenario is opgesteld op basis van de waargenomen zeespiegelstijging bij meetstations. De vijfjaarlijkse actualisering van het beleidsscenario leidt tot een actualisering van de gebruiksruimte voor delfstofwinning voor een periode van eveneens vijf jaar.

Het tweede scenario is het 'richtscenario' voor de relatieve zeespiegelstijging. Dit begrip is in de PB geïntroduceerd vanuit het besef dat vijf jaar een korte periode is voor de planning van een mijnbouwonderneming. Het richtscenario biedt handelingsperspectief voor de periode volgend op het beleidsscenario. Aan het richtscenario kunnen echter geen rechten worden ontleend en in die zin speelt het richtscenario een beperkte rol in de sturing van delfstofwinning. In tegenstelling tot het beleidsscenario is het richtscenario opgesteld op basis van klimaatprojecties.

De termen beleidsscenario en richtscenario wijken af van de algemene definitie van 'scenario', met name de term beleidsscenario. Scenario's beschrijven langetermijntrends en houden geen rekening met schommelingen van die trends door interne variabiliteit. Scenario's worden gebruikt voor langetermijnplanningen, zoals de te verwachte gemiddelde zeespiegelstijging tot 2100. Voor de korte termijn, zoals de gemiddelde zeespiegelstijging voor de komende vijf jaar, wordt gebruik gemaakt van trends. Deze trends zijn gebaseerd op waarnemingen over tijdreeksen van tientallen jaren en worden over een korte termijn geëxtrapoleerd. Een vergelijking tussen waarnemingen en scenario's op de korte termijn kan een verschil opleveren. Dit hoeft niet een indicatie voor inconsistentie te zijn, omdat waarnemingen korte en langjarige fluctuaties meten die niet in scenario's worden meegenomen.

Verder wordt in dit advies de term 'zeespiegel' gebruikt. In de context van kustbeheer wordt de term zeespiegel gebruikt voor de over langere tijd gemiddelde hoogte van het zeeoppervlak, waaruit de korte termijn fluctuaties (windgolven, getij, windopzet, etc.) nagenoeg zijn verwijderd. Wat overblijft is de geleidelijke verandering van de hoogte van het zeeoppervlak. 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.

De onderbouwing van het advies is als volgt opgebouwd. Eerst wordt de historie van het beleidsscenario, vanaf 1 januari 2006, toen voor het eerst een beleidsscenario werd toegepast, beschreven (paragraaf 2). Daarna worden aandachtspunten voor het opstellen van

¹ 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).

zeespiegelprojecties gedefinieerd op basis van recente wetenschappelijke inzichten (paragraaf 3), welke zijn meegenomen bij het opstellen van het nieuwe beleids- (paragraaf 4) en richtscenario (paragraaf 5). Het geadviseerde beleids- en richtscenario is opgenomen in paragraaf 6.

2 Historie van het beleidsscenario

Het eerste beleids- en richtscenario is opgesteld per 1 januari 2006. De scenario's zijn daarna elke vijf jaar geactualiseerd conform de nieuwste inzichten. Er zijn beleidsscenario's opgesteld per 1 januari 2006, 1 januari 2011 en 1 januari 2016, deze zijn weergegeven in figuur 2.1. Een korte samenvatting van deze scenario's volgt hieronder.

2.1 Beleidsscenario 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 meetstations² 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 eenparige versnelling verondersteld van 0,018 mm/jaar². Deze waarde is afgeleid door Church & White (2006) uit een wereldwijde dataset. Het beleidsscenario is zo opgebouwd dat het start met de eenparige 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 beleidsscenario per 1.1.2011

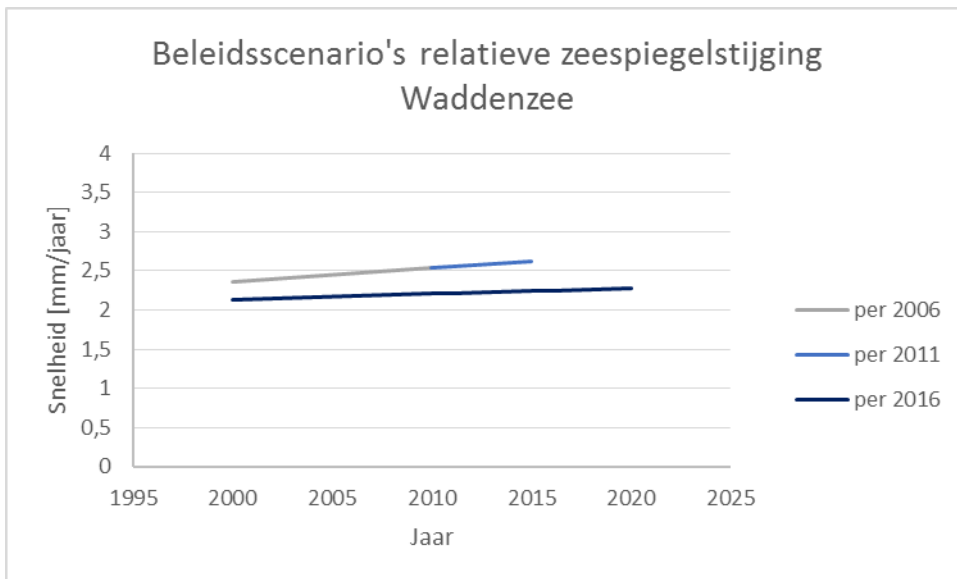
Voor de eerste actualisatie van het beleidsscenario is gebruik gemaakt van een rapport van Deltares, opgesteld in opdracht van de Waterdienst van Rijkswaterstaat ten behoeve van de suppletiebehoefte langs de Nederlandse kust (Dillingh et al., 2010). De in 2006 vastgestelde versnelling van 0,018 mm/jaar² 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). Het beleidsscenario voor de zeespiegelstijging voor de periode 2011-2016 is daarmee een voortzetting van het beleidsscenario 2007-2011.

2.3 Actualisatie beleidsscenario per 1.1.2016

Voor de tweede actualisatie van het beleidsscenario is gebruik gemaakt van de Zeespiegelmonitor rapporten uit 2014 en 2015 (Deltares, KNMI en HKV, 2014 en 2015). Deze rapporten beschrijven de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust met een lineaire snelheid. De studies geven geen indicatie voor een significante versnelling op regionale schaal in de Nederlandse kustzone. Uitgangspunt voor de actualisatie van het beleidsscenario was de gemiddelde zeespiegelstijging over de periode 1890-2013 voor de zes Nederlandse hoofdmeetstations³ (TNO, 2016). Dit resulteerde 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 eenparige 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 (Church & White, 2011).

² Den Helder, Kornwerderzand buiten, Vlieland haven, West-Terschelling, Harlingen, Nes, Schiermonnikoog, Lauwersoog, Eemshaven & Delfzijl.

³ Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl.



Figuur 2.1 Historische beleidssenario's voor de relatieve zeespiegelstijging in de Waddenzee.

3 Aandachtspunten bij het bepalen en voorspellen van de zeespiegelstijging

3.1 Temporele variabiliteit

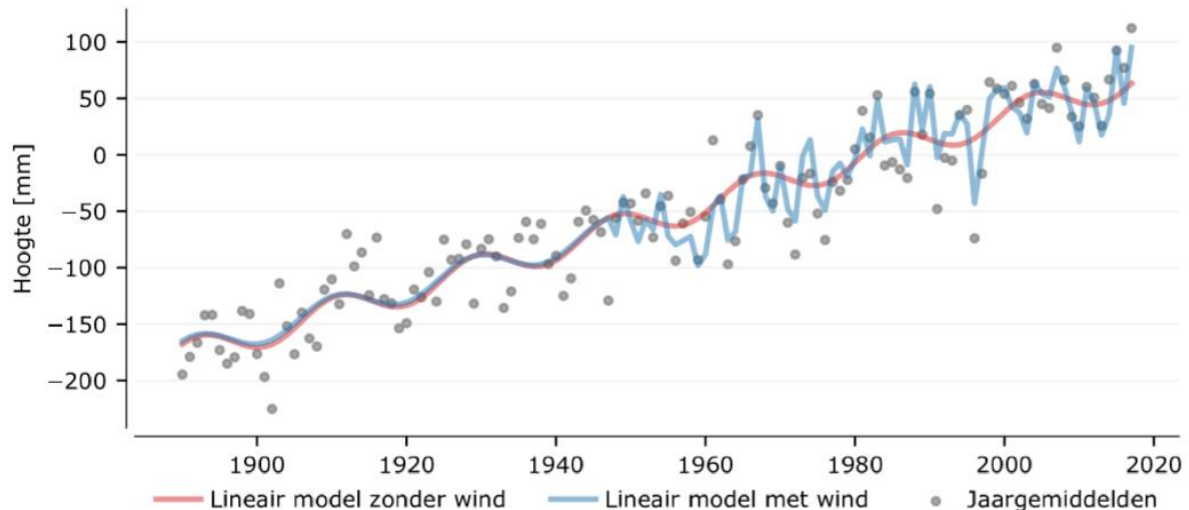
Regionaal en lokaal

De huidige zeespiegelstand voor de Nederlandse kust is voor 2017 vastgesteld op 6 cm boven Normaal Amsterdams Peil (NAP; Baart et al., 2019). Voor de periode 1890-2017 bedraagt de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust $1,86 \pm 0,12$ mm/jaar (Baart et al., 2019). Dit is de lineaire trend berekend op basis van meetgegevens van de hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust. Deze trend bevat de totale bodemdaling⁴ en de absolute stijging van de zeespiegel. De natuurlijke bodemdaling bedraagt 0,45 mm/jaar en de absolute zeespiegelstijging 1,41 mm/jaar.

Gedurende de periode 1890-2017 kwamen soms grote jaar op jaar verschillen in de zeespiegelstand voor (figuur 3.1). Hiervoor zijn verschillende oorzaken. Ten eerste zijn er variaties in de zeespiegelstand veroorzaakt door langjarige cycli van het getij. Van de langjarige getijdcomponenten⁵ heeft vooral de nodale cyclus van 18,613 jaar invloed op de jaargemiddelden (Baart et al., 2019). Daarbovenop kunnen grote jaar op jaar verschillen ontstaan door het wisselend aantal stormen en de intensiteit daarvan per jaar. Stormen kunnen kortstondig (uren tot dagen) voor meerdere meters wateropzet zorgen en in relatief stormrijke jaren leiden tot een centimeters hogere jaargemiddelde zeespiegelstand. Jaren met veel kustgerichte wind, vanuit het westen, hebben gemiddeld genomen een hogere zeespiegel. Verder kunnen oceaanstromingen sterk fluctueren en lokaal tijdelijke afwijkingen voor een periode van enkele maanden tot tientallen jaren veroorzaken (Vermeersen et al., 2018; Van den Hurk & Geertsema, 2020). Door deze voornamelijk stochastische processen, met uitzondering van de nodale cyclus, kennen analyses van getijdgegevens van voor het tijdperk met een sluitend meteorologisch meetnetwerk (voor 1949) en korte termijn (enkele jaren) bepalingen van de zeespiegelstand een grote onzekerheid.

⁴ De antropogene bodemdaling bij meetstation Hoek van Holland bedraagt 0,1 mm/jaar (Hijma & Kooi, 2018). Antropogene bodemdaling 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). De meetgegevens van hoofdmeetstation Delfzijl (figuur 3.3) bevatten derhalve geen antropogene bodemdaling.

⁵ De verschillende getijdcomponenten staan beschreven in Baart et al. (2019).



Figuur 3.1 De huidige zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust op basis van het jaargemiddelde van de zes hoofdmeetstations (grijze punten) voor de periode 1890-2017. De rode lijn is de trendlijn voor de jaargemiddelde zeespiegelstand bepaald met een regressiemodel waarin alleen informatie over de nodale cyclus en geen informatie over de windopzet is meegenomen. De blauwe lijn is de trendlijn uit een regressiemodel waarin zowel informatie over variatie in windopzet als de nodale cyclus is meegenomen (Baart et al., 2019).

Wereldwijd

Over de periode 1993-2020 bedraagt de gemiddelde wereldwijde zeespiegelstijging 3,3 mm/jaar (NASA, 2020). Dit is de wereldwijd gemiddelde lineaire trend berekend op basis van satellietdata.

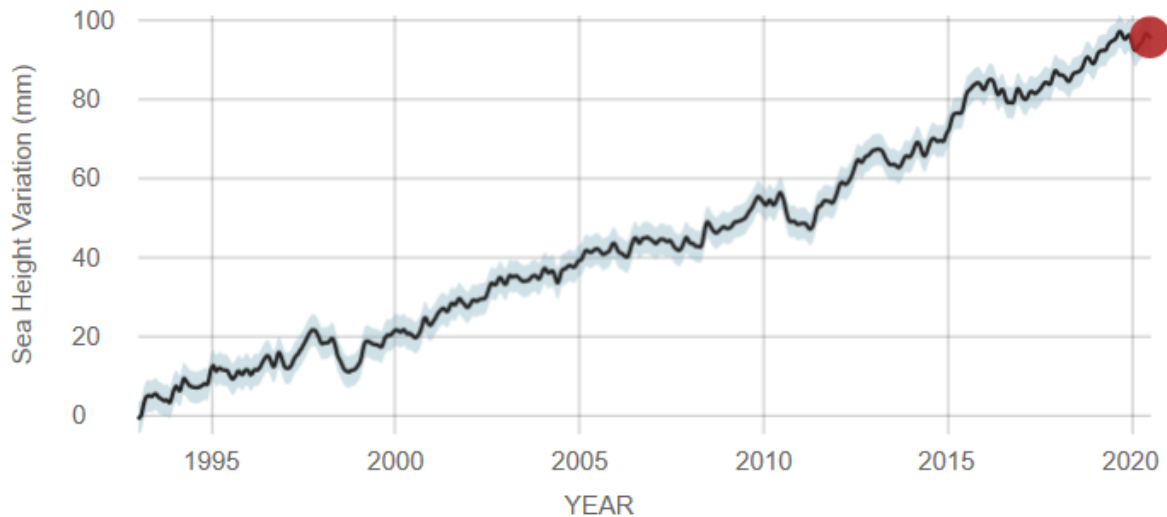
Ook wereldwijd zijn er temporele verschillen in de zeespiegelstijging (figuur 3.2). Er zijn verschillende processen die een effect hebben op de mondiale zeespiegelstijging. De tijdschaal waarop het effect op de zeespiegelstijging merkbaar wordt verschilt per proces (Van den Hurk & Geertsema, 2020). De processen zijn, onder andere, de uitzetting van water door opwarming (tijdschaal van tientallen jaren), 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). De nodale cyclus, die een duidelijke invloed heeft op de regionale jaargemiddelde zeespiegel, heeft geen effect op de wereldwijd gemiddelde trend.

SATELLITE DATA: 1993-PRESENT

Data source: Satellite sea level observations.
Credit: NASA Goddard Space Flight Center

RATE OF CHANGE

↑ 3.3
millimeters per year

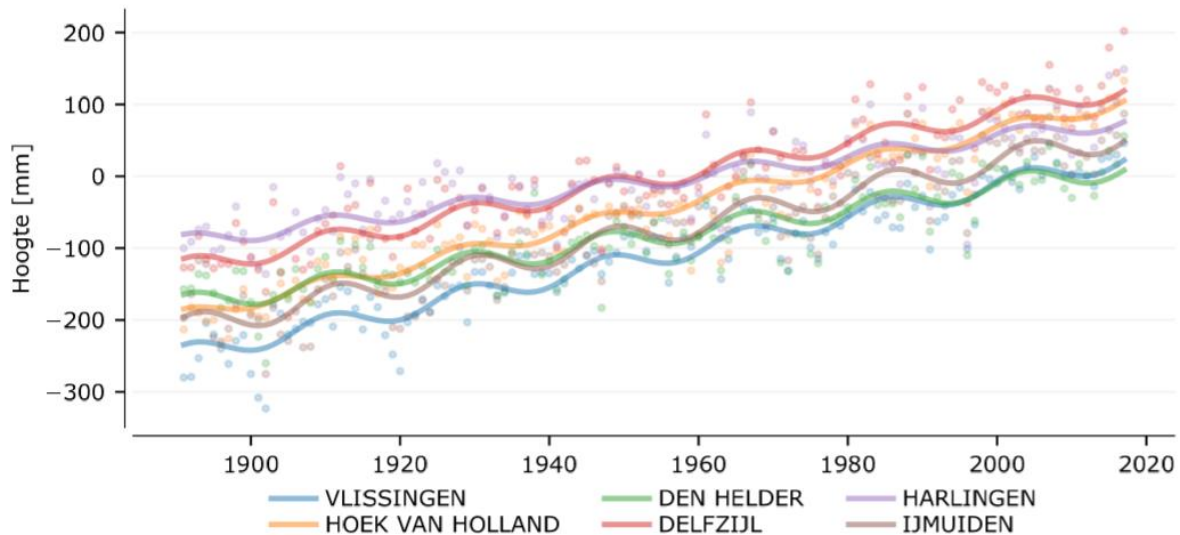


Figuur 3.2 Verandering van de wereldwijde zeespiegelstand sinds 1993, op basis van satellietmetingen. Deze grafiek laat de stand tussen januari 1993 tot en met juli 2020 zien (NASA, 2020).

3.2 Ruimtelijke variabiliteit

In figuur 3.3 zijn de jaargemiddelde zeespiegelstanden voor de zes hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust weergegeven. Deze getijddestations leveren sinds 1890, toen het NAP overal was doorgevoerd, betrouwbare metingen. Zowel de gemiddelde zeespiegelstand als de trend verschillen voor de zes hoofdmeetstations. Op regionaal niveau is de gemiddelde zeespiegelstand in het noorden van Nederland (Harlingen en Delfzijl) altijd hoger dan in het zuiden (Vlissingen). In recente jaren is de gemiddelde zeespiegelstand het laagste in Den Helder.

Voor de Waddenzee varieert de lineaire zeespiegelstijging in de periode 1890-2017 van $1,3 \pm 0,07$ mm/jaar voor Harlingen, tot $1,4 \pm 0,06$ en $1,9 \pm 0,08$ mm/jaar voor respectievelijk Den Helder en Delfzijl (Baart et al., 2019). Het getijddestation bij Delfzijl kent vanwege de ligging in de Eems een grotere invloed van stormen dan de andere hoofdmeetstations.



Figuur 3.3 Jaargemiddelde zeespiegelstand voor de verschillende hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust (punten) voor de periode 1890-2017. Voor de zes hoofdmeetstations is de trendlijn afzonderlijk weergegeven. De trendlijn is bepaald met een regressiemodel waarin alleen informatie over de nodale cyclus en geen informatie over de windopzet is meegenomen (Baart et al., 2019).

Naast metingen van getijdstations geven radarhoogtemetingen van het zeeoppervlak via satellieten ook informatie over de zeespiegelstijging. Dit is dezelfde gegevensbron als waarop de wereldwijde gemiddelden gebaseerd zijn (zie figuur 3.2). Deze gegevens zijn sinds 1993 ook voor de Waddenzee en Noordzeekust beschikbaar, maar de verwerking van de metingen heeft in kustgebieden een grotere onnauwkeurigheid dan op open zee. Dat maakt het gebruik van deze gegevens voor het vaststellen van ruimtelijke verschillen complex (Vermeersen et al., 2018). Meetgegevens van satellieten worden daarom met name gebruikt als verificatie van de trends die door plaatselijke getijdstations met grotere nauwkeurigheid worden gemeten.

3.3 Versnelling zeespiegelstijging

Wereldwijd stijgt de zeespiegel met 3,3 mm/jaar (figuur 3.2) ongeveer twee keer zo snel als langs de Nederlandse kust (circa 1,41 mm/jaar zonder bodemdaling gemeten over de periode 1890-2017). Analyses van de gemiddelde mondiale zeespiegelstijging laten zien dat deze aan het versnellen is (zie tabel 3.1). De mondiale versnelling is het gevolg van antropogene invloeden op het klimaat (Oppenheimer et al., 2019), wat leidt tot massaverlies van de Groenlandse ijskap en, op dit moment in mindere mate, van de Antarctische ijskap. Daarnaast spelen het smelten van berggletsjers en thermische expansie van het oceaanwater ook een rol in de versnelling.

Tabel 3.1 Gemiddelde mondiale zeespiegelstijging berekend over verschillende perioden (Oppenheimer et al., 2019).

Periode	Gemiddelde mondiale zeespiegelstijging [mm/j]
1901-1990	1,4
1970-2015	2,1
1993-2015	3,2
2006-2015	3,6

Langs de Nederlandse kust is het niet eenduidig of de zeespiegel versneld stijgt. Enerzijds wordt in de Zeespiegelmonitor 2018 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 20^e eeuw. Het 'gebroken trendmodel' geeft een statistisch significant knippunt in 1993 met een zeespiegelstijgingssnelheid van 1,8 mm/jaar in de periode voor het knippunt en van 2,4 mm/jaar na het knippunt. De kansverdeling die volgt uit de *Markov Chain Monte Carlo* analyse duidt op een knippunt in 1994 met een meest waarschijnlijke

zeespiegelstijgingsnelheid in de periode voor het knikpunt van 1,79 mm/jaar en na het knikpunt van 2,40 mm/jaar.

Door de trend in de zeespiegelstand vanaf het knikpunt te beschouwen is de periode (1993-2017 = 24 jaar) relatief kort ten opzichte van de nodale cyclus van 18,613 jaar. Echter, bij het bepalen van de trend is gebruik gemaakt van een regressiemodel waarin de totale zeespiegelverandering gemodelleerd wordt als de som van een trend, de nodale cyclus, windeffecten en een residu (Baart et al., 2019). Doordat de nodale cyclus onderdeel van het regressiemodel is, draagt de nodale cyclus niet meer bij aan de variatie. Hierdoor maakt het niet uit dat de periode waarover de trend is berekend kort is vergeleken met de periode van de nodale cyclus.

Er zijn ook andere studies die wijzen op een mogelijke versnelde zeespiegelstijging. Onderzoekers van de TU Delft vonden een mogelijke versnelde zeespiegelstijging na 1993 (Steffelbauer et al., 2020). Een recente analyse van de Vlaamse Milieumaatschappij van zeespiegelmetingen voor de Belgische kust wijst ook op een significante versnelling in de tweede helft van de 20^e eeuw (Brouwers, 2020). Deze aanwijzingen zijn onderzocht door Van den Hurk & Geertsema (2020). Zij concluderen dat zowel de trendlijn met een versnelling als de trendlijn zonder versnelling de waargenomen stijging statistisch even goed beschrijven. Daaruit wordt geconcludeerd dat in de Nederlandse kustzone een eventuele versnelling van de mondiale zeespiegelstijging niet duidelijk kan worden waargenomen vanwege de grote variabiliteit van jaar tot jaar.

Daarnaast kan het achterblijven van de versnelling langs de Nederlandse kust voor een deel mechanistisch verklaard worden door de vingerafdruk van de Antarctische en Groenlandse ijskap. Elke ijskap heeft een specifieke vingerafdruk voor de mondiale herverdeling van het afgesmolten ijs. De vingerafdruk van een ijskap kan veranderen met de tijd. Massaverlies van de Antarctische ijskap heeft een groot effect op de zeespiegelstand langs de Nederlandse kust. De bijdrage van het smeltwater van Antarctica op de zeespiegelstand langs de Nederlandse kust is 90-135% van de mondiaal gemiddelde zeespiegelstand, afhankelijk van de geografische ligging van de gebieden op Antarctica waar het smeltwater vandaan komt. De nettobijdrage van de Groenlandse ijskap is minder groot en bedraagt -45 tot 45% van het mondiale gemiddelde, afhankelijk van de geografische ligging van de herkomstgebieden van het smeltwater op Groenland. Massaverlies van de Groenlandse ijskap levert een belangrijke bijdrage aan de versnelling van de mondiale zeespiegelstijging die sinds 1993 plaatsvindt. Over de periode 1993-2018 is de bijdrage van de Groenlandse ijskap toegenomen tot 0,65 mm/jaar. Deze bijdrage is echter vrijwel nihil voor de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Daarentegen heeft massaverlies op Antarctica een kleinere bijdrage geleverd aan de versnelling van de mondiale zeespiegelstijging (0,32 mm/jaar), maar heeft wel een grote invloed op de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

4 Actualisatie beleidsscenario per 2021

4.1 Uitgangspunten

Het beleidsscenario betreft de trend in de jaargemiddelde zeespiegelstand in de Waddenzee tot 2026. Voor het opstellen van het beleidsscenario is gebruik gemaakt van de metingen van de zes hoofdmeetstations langs de Nederlandse kust (Baart et al., 2019) en niet alleen van de stations langs de Waddenkust. De reden hiervoor is dat metingen van zeespiegelstijging van de hoofdmeetstations een natuurlijke bodemdalingscomponent en morfologische aanpassingscomponenten bevatten die niet volledig ontrafeld en gekwantificeerd kunnen worden. Ook ruimtelijk-temporele analyses van het zakken van NAP-peilmerken rondom de getijdstations als onafhankelijke inschatting van de bodemdalingscomponent levert onvoldoende accurate en zekere waarden. Per meetstation kan hierdoor het natuurlijke bodemdalingssignaal te veel of te weinig gecorrigeerd zijn. Als alleen de drie hoofdmeetstations langs de Waddenkust zouden worden meegenomen, worden deze onder- en overschattingen onvoldoende uitgemiddeld.

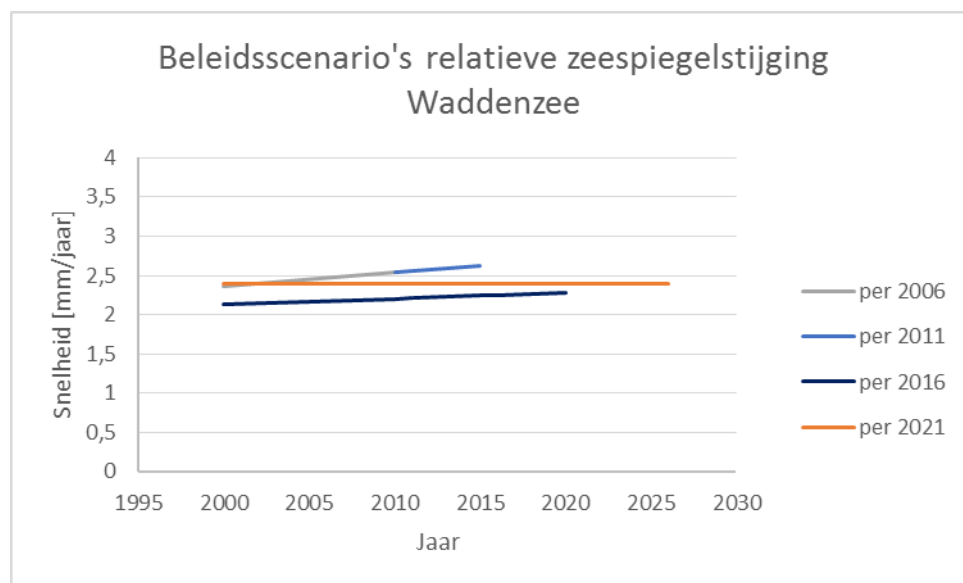
Er zijn verschillende analyses uitgevoerd voor het vaststellen van een mogelijke versnelde zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (zie ook paragraaf 3.3). Hieruit komt niet een eenduidig beeld naar voren of de zeespiegel daadwerkelijk versneld stijgt. Voor het beleidsscenario is, omwille

van het voorzorgsprincipe, aangenomen dat de zeespiegelstijging sinds het einde van de 20^e eeuw is versneld. Voor het vaststellen van de huidige trend in de zeespiegelstijging wordt daarom niet naar de periode vanaf 1890 gekeken, maar vanaf het moment dat de versnelling zichtbaar is in de data, het zogeheten knikpunt.

4.2 Formulering beleidsscenario

De twee statistische analyses in de Zeespiegelmonitor (Baart et al., 2019) wijzen op een mogelijk knikpunt in 1993 of 1994 (zie ook paragraaf 3.3). Beide analyses geven een trend voor de zeespiegelstijging van 1890 tot het knikpunt van 1,8 mm/jaar en voor de periode na het knikpunt tot en met 2017 van 2,4 mm/jaar. Voor het 'gebroken trendmodel' is de onzekerheid van de trend af te leiden, ervan uitgaande dat de data normaal verdeeld is. Dit model geeft een knikpunt in 1993 en een zeespiegelstijgingstrend van $2,4 \pm 1,5$ mm/jaar, waarbij 1,5 mm/jaar twee keer de standaardafwijking is. Voor het beleidsscenario wordt geadviseerd om de trend van $2,4 \pm 1,5$ mm/jaar te extrapoleren tot 2026 (zie figuur 4.1).

De mate van nauwkeurigheid, i.e. het aantal decimalen, van de geadviseerde zeespiegelstijgingstrend wijkt af van voorgaande adviezen voor het beleidsscenario (zie paragraaf 2). De aannames bij het bepalen van de trend en de bekende onzekerheden van de zeespiegelmetingen rechtvaardigen het geven van een groter aantal decimalen niet. Daarnaast wijkt de vorm van het geadviseerde beleidsscenario af van de voorgaande adviezen, waarin een constante eenparige versnelling is aangenomen (zie paragraaf 2). Met de huidige benadering wordt, in lijn met het voorzorgsbeginsel, een mogelijke versnelling vanaf 1993 op een vereenvoudigde, maar volledige, manier meegenomen.



Figuur 4.1 Het beleidsscenario per 1 januari 2021 ten opzichte van de historische beleidsscenario's voor de relatieve zeespiegelstijging in de Waddenzee.

5 Richtscenario vanaf 2026

Het richtscenario ziet verder vooruit dan het beleidsscenario en is opgesteld voor 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 nieuwste wetenschappelijke inzichten.

5.1 Uitgangspunten

Het uitgangspunt voor het richtscenario is de studie van Vermeersen et al. (2018) waarin zeespiegelprojecties voor de Waddenzee worden gepresenteerd. Deze zeespiegelprojecties zijn geformuleerd op basis van mondiale klimaatprojecties uit het *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC AR5; Church et al., 2013). In het IPCC AR5 rapport zijn verschillende scenario's gedefinieerd voor de ontwikkeling van de concentraties van

broeikasgassen in de atmosfeer, dit zijn de zogeheten *Representative Concentration Pathways* (RCP). De RCP-scenario's vormen de basis voor de IPCC-projecties voor de mondiale zeespiegel. De IPCC-projecties bevatten oceaansterische en dynamische veranderingen, veranderingen in de ijskap- en gletsjermassa's, grondwaterwinning, atmosferische drukverandering en glaciële isostatische aanpassing (GIA) die afhankelijk zijn van de RCP-scenario's. Vermeersen et al. (2018) hebben de mondiale IPCC-projecties aangevuld met lokale variabiliteit voor de Waddenzee op basis van de waarnemingen van de getijdenstations Den Helder en Delfzijl over de periode 1865-2015. Dit is gedaan voor drie RCP-scenario's RCP2.6, RCP4.5 en RCP8.5, waaruit verschillende Waddenzee specifieke zeespiegelprojecties volgen.

Voor het richtscenario zijn de zeespiegelprojecties voor de Waddenzee opgesteld zoals beschreven in Vermeersen et al. (2018), maar afwijkend op een paar punten, namelijk 1) de periode waarover de gemiddelde zeespiegelstand is berekend; 2) de vingerafdruk van Antarctica en Groenland; 3) de mate van natuurlijke bodemdaling; en 4) een biascorrectie. Deze punten zijn hieronder verder toegelicht.

Vermeersen et al. (2018) gebruiken de jaargemiddelde zeespiegelstand gebaseerd op de waarnemingen van de getijdenstations Den Helder en Delfzijl. De jaargemiddelde zeespiegelstand kan echter sterk variëren door wind en stormen. Om de invloed van deze fluctuaties op de projectie te beperken is voor het richtscenario het 10-jaars gemiddelde van de waarnemingen genomen.

Ook gaat dit advies uit van een andere vingerafdruk voor de bijdrage van massaverlies van de Antarctische en Groenlandse ijskap. De vingerafdruk in Vermeersen et al. (2018) is gebaseerd op observaties vanaf 2002. Deze observaties kennen een sterke invloed van natuurlijke variaties in, onder andere, sneeuwval. Verwacht wordt dat de vingerafdruk in de toekomst zal veranderen, omdat de bijdrage van de Antarctische ijskap steeds verder zal toenemen. De verwachting is dat dit medio 2050 een significante invloed zal hebben op de klimaatscenario's RCP4.5 en RCP8.5 (DeConto & Pollard, 2016). In dit advies is de vingerafdruk van massaverlies van de Groenlandse en Antarctische ijskap op de zeespiegel aan de Nederlandse kust gebaseerd op de door de IPCC gehanteerde patronen voor lokale zeespiegelstijging die representatief zijn voor toekomstscenario's (Oppenheimer et al., 2019).

Daarnaast is in dit advies de natuurlijke bodemdaling expliciet meegenomen om zo tot een relatieve zeespiegelstijgingsprojectie te komen. De natuurlijke bodemdaling, zoals die ook in de Zeespiegelmonitor 2018 en het beleidsscenario is verwerkt, is in Nederland een optelsom van bijdragen door twee geologische processen:

1. tektonische processen van het Noordzeebekken: wegzakken door rekspanningen in de aardkorst, versterkt door toenemend gewicht van accumulerend sediment;
2. GIA als gevolg van de nabijheid tot Scandinavië: terugzakken van de aardkorst in trage reactie op het wegsmelten van het landijs van de laatste ijstijd.

De waarde voor de bodemdaling die in de zeespiegelprojecties door Vermeersen et al. (2018) is opgenomen is 1,16 mm/jaar. Deze waarde is hoog vergeleken met de studies waarnaar wordt verwezen in het artikel van Vermeersen et al. (2018), zoals het model van Bradley et al. (2011) dat voor de Waddenzee een waarde van 0,5 mm/jaar geeft. In de studie van Hijma en Kooi (2018) wordt de totale bodemdaling door natuurlijke processen beschouwd, waaruit een gemiddelde waarde van 0,45 mm/jaar blijkt. Deze waarde wordt ook gebruikt in de Zeespiegelmonitor 2018. Voor het opstellen van het richtscenario is daarom een bodemdalingssnelheid van 0,45 mm/jaar gebruikt.

Verder is er in dit advies gecorrigeerd voor de bias in de door het IPCC gepubliceerde projecties ten opzichte van de waargenomen trends over de periode van 1986-2006 tot 2007-2019. De projecties in het IPCC-rapport bevatten een systematische overschatting van gletsjersmelt in deze periode en de gebruikte klimaatmodellen bevatten ook een overschatting van de mondiaal gemiddelde warmteopname door oceanen. De correctie voor deze bias is bepaald aan de hand van een budgetanalyse door het KNMI op basis van de data van Frederikse et al. (2020) en is in totaal 1,0 mm/jaar.

Tot slot, de drie RCP-scenario's gebruikt in Vermeersen et al. (2018) geven verschillende zeespiegelprojecties. Gelet op het doel en de toepassing van dit advies is het nodig om één RCP-scenario te selecteren voor de formulering van het richtscenario. De toekomstige zeespiegelstijging hangt sterk af van de toekomstige ontwikkeling van broeikasgassen in de atmosfeer en daarmee welk RCP-scenario wordt gevolgd. Zowel het RCP4.5 als het RCP6.0-scenario zijn gematigde scenario's waarin wordt verondersteld dat er beleid tot stand komt waardoor de uitstoot van broeikasgassen wordt beperkt. Het RCP6.0-scenario is echter minder ver uitgewerkt dan het RCP4.5-scenario en specifieke informatie voor de Waddenzee is niet beschikbaar voor dit scenario. Daarnaast wijzen verschillende analyses (Wang et al., 2018; Salawitch et al., 2019; Hausfather & Peters, 2020) erop dat het RCP4.5-scenario goed past bij de beleidstoezeggingen die zijn gedaan om de doelen gesteld in het Parijs-akkoord te halen. 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). Dit leidt tot de selectie van het RCP4.5-scenario voor het richtscenario met de kanttekening dat dit scenario van toepassing is onder voorbehoud van een sterkere inzet van mondiale regeringen, met name buiten Europa, voor het verduurzamen van hun economieën.

5.2 Formulering richtscenario

Uitgaand van het RCP4.5-scenario en de bovengenoemde aanpassingen volgt de zeespiegelprojectie voor de Waddenzee. In tabel 5.1 is de projectie van de 10-jaar gemiddelde relatieve zeespiegelstijging sinds 2020 voor de Waddenzee weergegeven. De zeespiegelstijging is weergegeven voor verschillende zekerheidsintervallen, waarbij blijkt dat er een grote spreiding (onzekerheid) is voor de toekomstige ontwikkeling van de zeespiegelstand. De mediane waarde voor de stijging in de zeespiegelstand in het jaar 2050 is 13,0 cm ten opzichte van 2020. Met een waarschijnlijke zekerheid (17-83%) kan gezegd worden dat de waarde tussen 11,1 en 15,0 cm ligt; voor een zeer waarschijnlijke zekerheid (5-95%) ligt de waarde tussen 9,2 en 17,0 cm. Ook de snelheid van de zeespiegelstijging kent een grote onzekerheid (tabel 5.2). De mediane waarde voor de stijgingssnelheid in het jaar 2050 is 4,5 mm/jaar. Waarschijnlijk (17-83%) ligt de waarde tussen 3,8 en 5,3 mm/jaar en zeer waarschijnlijk (5-95%) ligt de waarde tussen 3,0 en 6,2 mm/jaar.

Tabel 5.1 10-jaar gemiddelde relatieve zeespiegelstijging sinds 2020 voor het RCP4.5-scenario in de Waddenzee. Zonder natuurlijke variabiliteit en uitgaand van een natuurlijke bodemdalingscomponent van 0,45 mm/j en bias-aanpassingen in de stijgingssnelheid van 1,0 mm/j. Het betrouwbaarheidsinterval van de projectie is weergegeven met de 17-83% range (de waarschijnlijke waarde) en de 5-95% range (de zeer waarschijnlijke waarde).

Jaar	Relatieve zeespiegelstijging ten opzichte van 2020 [cm]				
	5% (ondergrens)	17%	50% (mediaan)	83%	95% (bovengrens)
2030	3,1	3,6	4,2	4,8	5,3
2050	9,2	11,1	13,0	15,0	17,0

Tabel 5.2 Snelheid relatieve zeespiegelstijging voor het RCP4.5-scenario in de Waddenzee. Zonder natuurlijke variabiliteit en uitgaand van een natuurlijke bodemdalingscomponent van 0,45 mm/j en bias-aanpassingen in de stijgingssnelheid van 1,0 mm/j. Het betrouwbaarheidsinterval van de projectie is weergegeven met de 17-83% range (de waarschijnlijke waarde) en de 5-95% range (de zeer waarschijnlijke waarde).

Jaar	Snelheid relatieve zeespiegelstijging [mm/j]				
	5% (ondergrens)	17%	50% (mediaan)	83%	95% (bovengrens)
2020	3,1	3,6	4,1	4,6	5,2
2030	3,1	3,7	4,3	4,9	5,5
2050	3,0	3,8	4,5	5,3	6,2

De stijgingsnelheid op basis van de klimaatprojectie uit 2013 en de hierboven beschreven aanpassingen heeft voor het jaar 2020 een mediaan van 4,1 mm/jaar (tabel 5.2). Dit is 1,7 mm/jaar hoger dan de geobserveerde trend van 2,4 mm/jaar (zie paragraaf 4). Deze discrepantie tussen waarneming en projectie is goed te verklaren. Ten eerste, doordat wateropzet door stormen de afgelopen 25 jaar is afgenomen, is de toename van de zeespiegel voor de Nederlands kust achtergebleven bij de projecties die dit effect niet meenemen omdat klimaatmodellen geen systematische verandering in winden boven de Noordzee laten zien in een toekomstig klimaat. Ten tweede is de extra opwarming en verzoeting van de Noordoost Atlantische Oceaan ten opzichte van het mondiaal gemiddelde minder snel verlopen vergeleken met de projecties in klimaatmodellen. Ten derde is de vingerafdruk van de bijdrage van het massaverlies van de ijskappen op Antarctica en Groenland voor de Nederlandse kust in beide gevallen lager dan aangenomen in de projecties. De oorzaak hiervan is tweeledig. Enerzijds was er meer sneeuwval (wat tot massatoename van de ijskap leidt) dan normaal in gebieden die verder verwijderd zijn van Nederland, en anderzijds was er minder smelt (wat tot massaverlies van de ijskap leidt) dan normaal in gebieden die dichterbij liggen. Dit had tot gevolg dat de effectieve vingerafdruk van netto massaverlies van de Groenlandse en Antarctische ijskap (tijdelijk) lager was dan aangenomen in de projecties.

Ondanks dat de verschillen tussen de projecties en de waarnemingen goed te duiden zijn, is het niet mogelijk om deze te kwantificeren. Vooralsnog is het achterblijven van de geobserveerde stijgingsnelheid te verklaren door natuurlijke fluctuaties die moeilijk te voorspellen zijn. Wel kan gesteld worden dat de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust niet uit de pas kan blijven lopen met de mondiale zeespiegelstijging, met in achtneming van de vingerafdruk voor Groenland. Daarnaast zijn de stijgingsnelheid en -versnelling op korte termijn moeilijk te detecteren door de grote variabiliteit in de jaargemiddelde zeespiegel. 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). Deze variatie kan niet aan de stijgingstrend worden gekoppeld. 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 2,4 mm/jaar met 0,9 en 3,9 mm/jaar als waarde voor respectievelijk de onder- en bovengrens van het 5-95% betrouwbaarheidsinterval.

Desalniettemin heeft het geobserveerde verschil in de stijgingsnelheid ten opzichte van de projecties de aandacht. Het KNMI zal in de komende jaren verder onderzoeken in hoeverre hier sprake is van een toevallig effect veroorzaakt door fluctuaties of van systematische effecten gerelateerd aan atmosferische circulatieveranderingen en veranderingen in oceaanstromingen die niet goed door de modellen worden weergegeven.

Voor het richtscenario wordt geadviseerd om van een zeespiegelstijgingsnelheid van 4,5 mm/jaar in het jaar 2050 uit te gaan, waarbij moet worden opgemerkt dat de waarde met zeer waarschijnlijke zekerheid tussen 3,0 en 6,2 mm/jaar ligt.

Een interpolatie tussen de zeespiegelstijgingsnelheid in 2026 en 2050 doet, op welke wijze dan ook, geen recht aan de verschillen tussen projecties en waarnemingen en de onzekerheden, en kan niet als een realistisch verloop van de zeespiegelstijgingsnelheid worden beschouwd. Op dit moment is het verschil tussen de waarnemingen en projecties groot. Het is onvermijdelijk dat de zeespiegelstijging tussen nu en 2050 ook langs de Nederlandse kust in grotere mate zal gaan versnellen. Het is echter onbekend wanneer dit zal gebeuren en zichtbaar wordt in de metingen. Een uitspraak over de zeespiegelstijging in 2030 laat zich daarom moeilijk onderbouwen.

6 Advies

De bovenstaande evaluatie leidt tot de volgende formulering van het geadviseerde beleidsscenario per 1 januari 2021 en richtscenario per 1 januari 2026 voor de relatieve zeespiegelstijging, inclusief natuurlijke en exclusief antropogene bodemdaling, ten behoeve van de vaststelling van de gebruiksruijnte voor delfstofwinning onder de Waddenzee volgens het 'Hand aan de Kraan' principe:

- Tot 2026: $2,4 \pm 1,5$ mm/jaar
- Vanaf 2026: toenemend tot 4,5 mm/jaar in 2050

Bij het richtscenario moet worden opgemerkt dat de waarde met zeer waarschijnlijke zekerheid tussen 3,0 en 6,2 mm/jaar ligt.

Daarnaast doet een interpolatie tussen de zeespiegelstijgingssnelheid in 2026 en 2050, op welke wijze dan ook, geen recht aan de onzekerheden beschreven in paragraaf 5 en kan niet als een realistisch verloop van de zeespiegelstijgingssnelheid worden beschouwd.

Mochten er in de toekomst, naar aanleiding van de vastgestelde scenario's, zorgen zijn over een mogelijke overschrijding van het meegroeivermogen en daarmee aantasting van de natuurwaarden, dan kan dit getoetst worden op basis van de werkelijk opgetreden relatieve zeespiegelstijging en bodemdaling door gaswinning (cf. het Rijksprojectbesluit).

7 Referenties

- 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, 11202193-000-ZKS-0004.
- Brouwers, J., 2020. Zeeniveau. Vlaamse Milieumaatschappij. <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/zeeklimaat/zeeniveau>.
- Church, J.A., N.J. White, 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, doi: 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.
- 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, KNMI en HKV, 2014. Zeespiegelmonitor. Deltares, 1208712-000.
- Deltares, KNMI en HKV, 2015. Zeespiegelmonitor – Rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging. Deltares, 1209426.202.
- Dillingh, D., F. Baart, J.G. de Ronde, 2010. Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Deltares, 1202993-002.
- 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>
- 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, 11200538-008-ZKS-0001.
- Van den Hurk, B., T. Geertsema, 2020. Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust en de regionale bestuurlijke consequenties. Deltares, 11204868-002-ZWS-0001.
- Ministerie van Economische Zaken, 2006. Gaswinning binnen randvoorwaarden. Passende beoordeling van het Rijksprojectbesluit over aardgaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen.
- NASA, 2020. Global climate change, vital signs of the planet – Sealevel. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>.
- Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Mignan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meysignac, 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.

- 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; DOI: 10.1073/pnas.2007117117
- Steffelbauer, D.B., J. Timmermans, M. Bakker, R.E.M. Riva, J.H. Kwakkel, 2020. Monitoring for timely adaptation to sea-level rise – The likelihood of an acceleration based on tide-gauge data. TU Delft, DeltaLinks. <https://flowsplatform.nl/#/monitoring-for-timely-adaptation-to-sea-level-rise--the-likelihood-of-an-acceleration-based-on-tide-gauge-data>.
- 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.
- 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. doi:10.1017/njg.2018.7.
- 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*. DOI: 10.1080/04353676.2018.1488538.