

Memo

Aan
Rijkswaterstaat WVL

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
5 december 2013	1208268-000-ZKS-0005	23
Van	Doorkiesnummer	E-mail
John de Ronde	+31 (0)88 33 58 062	john.deronde@deltares.nl

Onderwerp
Nieuwe inzichten ten aanzien van zeespiegelstijging vanuit het nieuwe IPCC rapport en overige literatuur

1 Inleiding

Dit memo is opgesteld op verzoek van RWS naar aanleiding van de nieuwe inzichten op het gebied van zeespiegelstijging die in 2013 zijn opgedaan (o.a. IPCC) en geeft een overzicht van relevante nieuwe inzichten op het gebied van zeespiegelstijging en beschrijft kort de impact van deze nieuwe inzichten voor RWS als (stormvloed)keringbeheerder.

Recent is het nieuwe IPCC 2013 rapport van Werkgroep I (The Physical Science Basis) verschenen samen met de zogenaamde "Summary for policy makers". Op dit WGI rapport staat nog Final Draft omdat de laatste aanpassingen die in de Summary for policy makers gemaakt zijn hierin nog verwerkt moeten worden. Daarnaast is er het afgelopen jaar ook veel nieuwe literatuur verschenen over dit onderwerp. Op de KNMI website is een goede samenvatting te vinden van de nieuwe IPCC resultaten. Dit werk zal in deze rapportage niet overgedaan worden. Onderstaande tekst is opgebouwd uit de samenvatting van het KNMI in aparte gekaderde tekstblokken waaraan een aantal relevante zaken toegevoegd zijn.

De memo bestaat uit vijf onderdelen, belangrijke begrippen (H2), de opgetreden stijging tot nu toe (H3), de scenario's voor forcering en temperatuur voor de toekomst (H4), de scenario's voor zeespiegelstijging voor de toekomst (H5 en 6). Relevante nieuwe inzichten vanuit de literatuur, voor zover niet meegenomen in het IPCC rapport, worden hierin gelijk meegenomen. Ten slotte staan in H7 de conclusies ten behoeve van keringbeheer.

Eind dit jaar komen Deltares, HKV en KNMI met het rapport Monitoring Zeespiegelstijging naar buiten. In het voorjaar van 2014 komt het KNMI met een rapport met nieuwe klimaat scenario's voor Nederland.

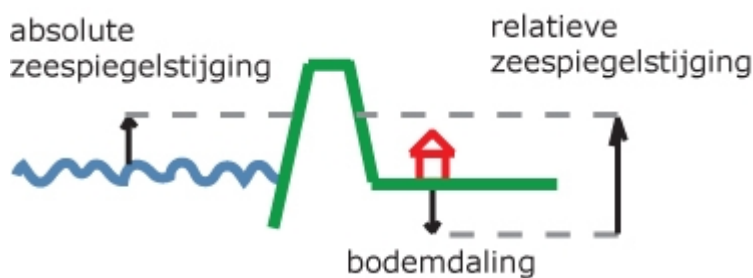
2 Belangrijke begrippen

Absolute en relatieve zeespiegelstijging

Bij zeespiegelstijging moet onderscheid gemaakt worden tussen de absolute zeespiegelstijging (AZSS) (stijging ten opzichte van een vast referentie niveau, het middelpunt van de aarde) en relatieve zeespiegelstijging, zie ook figuur 2.1. De relatieve zeespiegelstijging (RZSS) is ten



opzichte van het landniveau, dus inclusief bodemdaling. In Nederland wordt hiervoor de daling van de pleistocene ondergrond genomen. De peilmeetstations zijn daarom voorzien van een zogenaamde nulpaal die gefundeerd is op het pleistoceen, de waterstanden worden gemeten ten opzichte van deze nulpaal. De inklinking van de daarboven gelegen grond wordt dus niet meegenomen. Voor de primaire keringen (duinen en dijken) is deze component gelukkig gering (minder dan 1 cm per eeuw), voor veengebieden kan deze substantieel zijn (zelfs tot 100 cm per eeuw).



Figuur 2.1: Relatie absolute en relatieve zeespiegelstijging

Regionale zeespiegelstijging

Dat de bodemdaling regionaal bepaald is is bekend. Zo hebben Scandinavië en Schotland bijvoorbeeld een bodemstijging omdat de aarde “terugveert” na het verdwijnen van de zware ijskap na de laatste ijstijd. In Nederland zorgt deze terugvering juist voor bodemdaling omdat tijdens de ijstijd de bodem door de ijskappen juist iets omhoog gedruwd werd.

Ook de absolute zeespiegelverandering is echter regionaal verschillend, doordat het zwaartekrachtsveld verandert (door onder andere verandering van de ijskappen van Groenland en Antarctica en door de veranderingen in temperatuur en zoutgehalte van de oceanen). Het gemiddelde oppervlakte van de oceanen (en de Noordzee), de geoïde genoemd, verandert daardoor regionaal.

De regionale zeespiegelstijging in Nederland wordt daardoor bepaald door drie componenten:

- Toename van het volume water in de oceanen,
- Regionale verandering van de geoïde en
- Regionale veranderingen van de bodem.

3 De zeespiegelstijging tot nu

KNMI:

Zeespiegelveranderingen gemeten

27 september 2013

Caroline Katsman en Hylke de Vries (KNMI)

Veranderingen in de zeespiegel kunnen we meten, met behulp van peilschalen langs de kust en – sinds 1992 - met satellieten.

Hoeveel is de zeespiegel wereldwijd gestegen in de 20e eeuw?

Wereldwijd is de zeespiegel tussen 1901 en 2010 gestegen met 17 tot 21 centimeter. Het gemiddelde tempo van zeespiegelstijging over die periode bedroeg 1.5 tot 1.9 millimeter per jaar [bron: IPCC 5e Assessment Rapport, 2013].

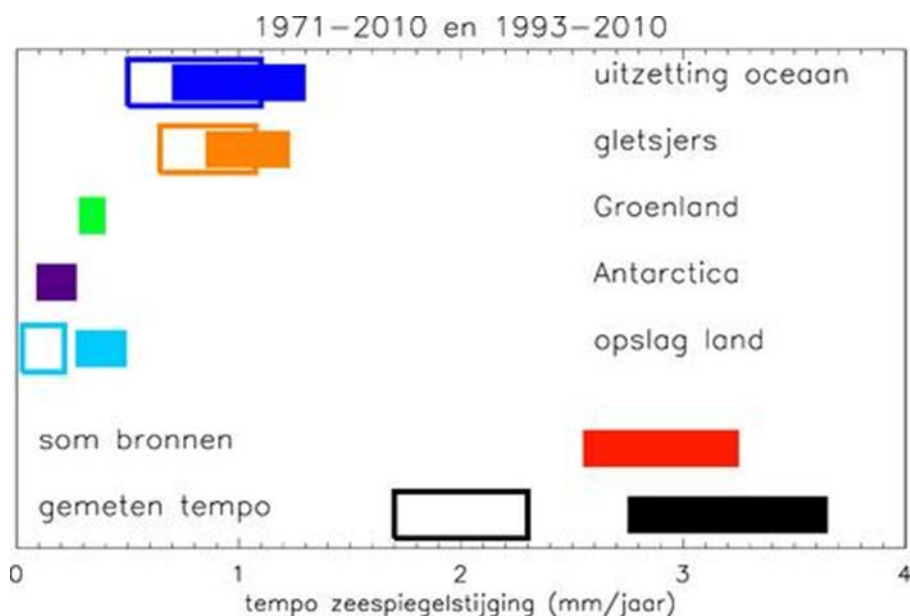
Wat veroorzaakte deze zeespiegelstijging?

De belangrijkste bijdragen komen van (Figuur 1):

- het smelten van gletsjers en kleine ijskappen
- de uitzetting van het zeewater
- het smelten van de Groenlandse ijskap
- het afkalven van de Antarctische ijskap en
- veranderingen in de opslag van water op land.

Over de periode na 1970 zijn genoeg gegevens beschikbaar om de zeespiegelstijging ten gevolge van de uitzetting, het smelten van gletsjers, en veranderingen in opslag op land te bepalen. Voor de bijdragen van Groenland en Antarctica kan dit pas vanaf 1993.

Figuur 1 Gemeten wereldwijde zeespiegelstijging in de 20e eeuw per bijdragende bron (open balken: 1971-2010; gesloten balken: 1993-2010; bron cijfers: IPCC 5e Assessment Rapport 2013).



Hoeveel steeg de zeespiegel de afgelopen jaren?

De zeespiegel stijgt de laatste jaren sneller: satellietmetingen laten een wereldgemiddelde zeespiegelstijging van 2.8 tot 3.6 millimeter per jaar zien tussen 1993 en 2010. ruim 3 millimeter per jaar zien voor de periode 1993-2003. Omdat de reeks van satellietmetingen nog relatief kort is kan niet worden uitgesloten dat deze versnelling (deels) veroorzaakt wordt door natuurlijke schommelingen in het zeeniveau door variaties in zeestromingen.

De bijdragen van de verschillende bronnen (gesloten balken in Figuur 2) zijn allemaal toegenomen ten opzichte van de periode 1971-2010. De som van de verschillende bijdragen en het gemeten totaal komen voor deze periode goed overeen. Dit biedt vertrouwen dat er voldoende begrip is van de processen die zeespiegelstijging veroorzaken.

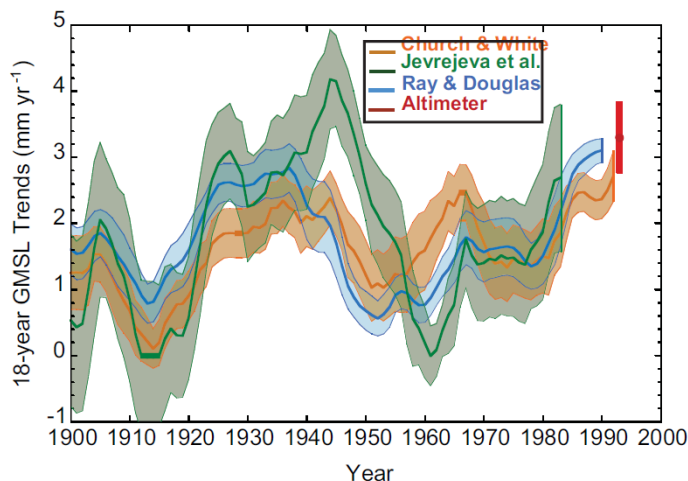
Dit jaar zal Deltares samen met HKV en het KNMI het rapport Monitoring Zeespiegelstijging afronden. Hierin worden de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust en in de Noordzee besproken.

In 2010 is uit het Deltares (Deltares, 2010) onderzoek gebleken dat voor Nederland vanaf 1900 de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging 19 cm (17-20) per eeuw bedroeg.

Volgens het IPCC bedraagt de wereld gemiddelde absolute zeespiegelstijging vanaf 1900 17 cm per eeuw (15-19), iets minder dan de waarde voor Nederland, de regionale bodemdaling is vermoedelijk de belangrijkste oorzaak voor dit verschil naast de regionale verandering in de geoïde. De satellietdata laten over de periode 1993-2010 een gemiddelde stijging van de absolute zeespiegel zien van ruim 30 cm per eeuw. De grote vraag is of deze grotere stijging nu veroorzaakt wordt door de klimaatsverandering of door veeljarige fluctuaties in het zeeniveau. Figuur 3.1 laat zien dat deze fluctuaties wereldgemiddeld nog aanzienlijk zijn en dat moeilijk aan te geven is of wij nu al werkelijk een versnelling van de zeespiegelstijging wereldwijd kunnen constateren.

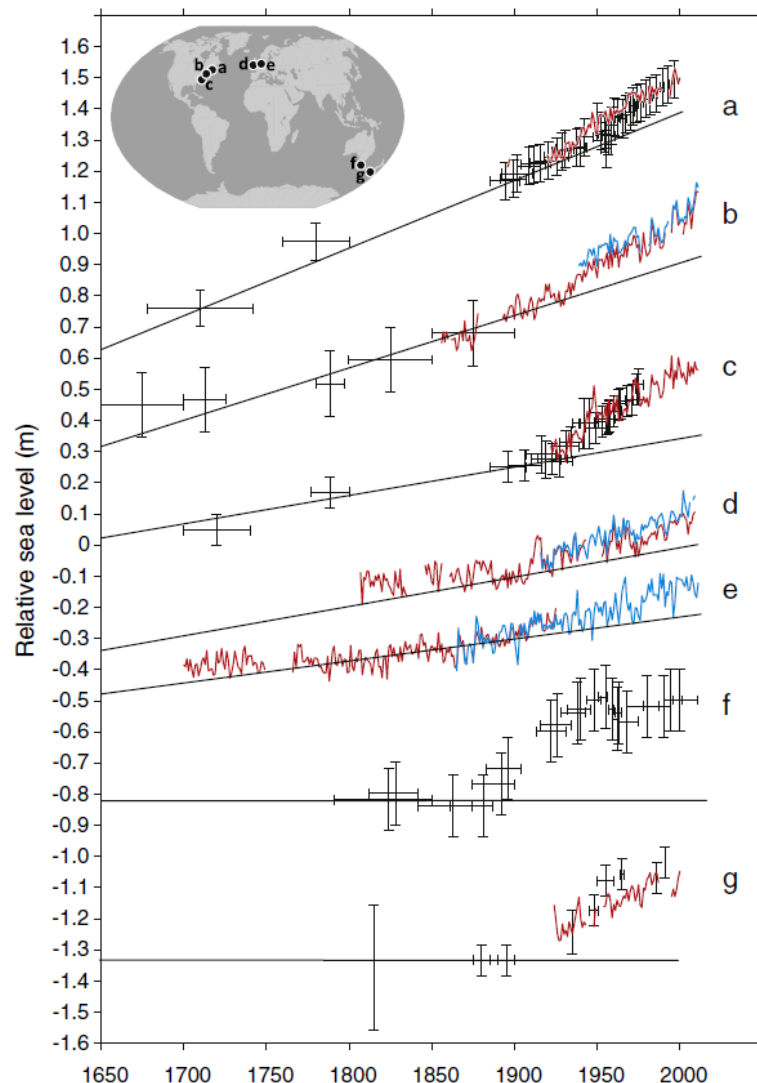
Toch zegt het IPCC het volgende zowel in de Summary for policy makers als in H13 van het WGI rapport:

*The combination of paleo sea level data and long tide gauge records confirms that the rate of rise has increased from low rates of change during the late Holocene (order tenths of mm yr⁻¹) to rates of almost 2 mm yr⁻¹ averaged over the 20th century, **with a likely continuing acceleration during the 20th century.***



Figuur 3.1: Veranderingen in de trends van wereldgemiddelde zeespiegelstijging over de periode 1900 – 2000. De rode balk met stip geeft de trend volgens de satelliet waarnemingen weer (figuur 3.14 uit het IPCC WGI Rapport)

Volgens het IPCC is er waarschijnlijk een versnelling geweest in de 20-ste eeuw (1900 -2000) van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging. Recente literatuur (Gehrels e.a.,2013 en Chambers e.a.,2012) bespreekt de nodige problemen ten aanzien van een dergelijke uitspraak. Chambers e.a., 2012 bespreekt de mogelijkheid van een 60 jarige oscillatie in het zeespiegelsignaal. Alhoewel statistisch significant in de meeste oceaانبekkenen zijn de beschouwde reeksen kort (100-120 jaar) ten aanzien van de beschouwde oscillatie en is toch niet met grote zekerheid aan te geven of deze oscillatie bestaat.



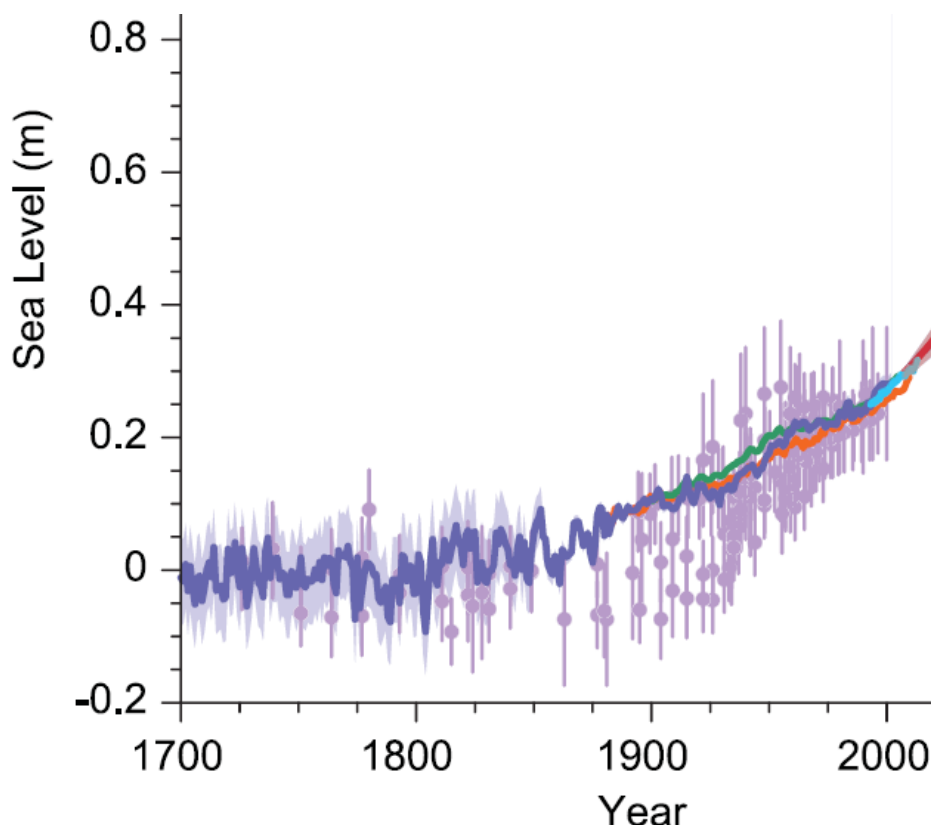
Figuur 3.2: Knik in zeespiegelstijging volgens 7 locaties. Grafiek e) is opgebouwd uit de meetgegevens van Amsterdam en Den Helder. De getrokken lijn bij e) betreft de trend (7 cm per eeuw) bepaald over de laatste 5000 jaar verkregen uit geologische schorgegevens van de locatie Schokland.



Gehrels e.a., 2013 bespreken de aanwezigheid van één of meerdere knikken in het zeespiegelsignaal, vooral de versnellingsknik rond 1930. Bijvoorbeeld in de gecombineerde reeks van Amsterdam en Den Helder ligt deze knik tussen 1905 en 1910 (Gehrels e.a. 2013), zie figuur 3.2. De door het IPCC genoemde versnelling in de twintigste eeuw wordt voornamelijk door deze knik bepaald en is niet te relateren aan het broeikasprobleem.

Voor de Nederlandse kust is geen versnelling aantoonbaar (Baart e.a., 2012a en b, Deltares, 2010). De fluctuaties in de snelheid van zeespiegelstijging op wereldschaal zijn waarschijnlijk slecht of niet gecorreleerd met de fluctuaties op de regionale schaal. In het rapport Monitoring Zeespiegelstijging zal hier voor de Nederlandse situatie nog verder op in gegaan worden.

In het IPCC rapport wordt gesproken over een verdere versnelling (continuïng acceleration). Dit komt omdat, zoals hier boven omschreven, er een versnelling is geconstateerd tussen de 19 de en de 20 ste eeuw. In en voor de 18 de eeuw was de zeespiegelstijging namelijk gering of nul (zie figuren 3.2 en 3.3).



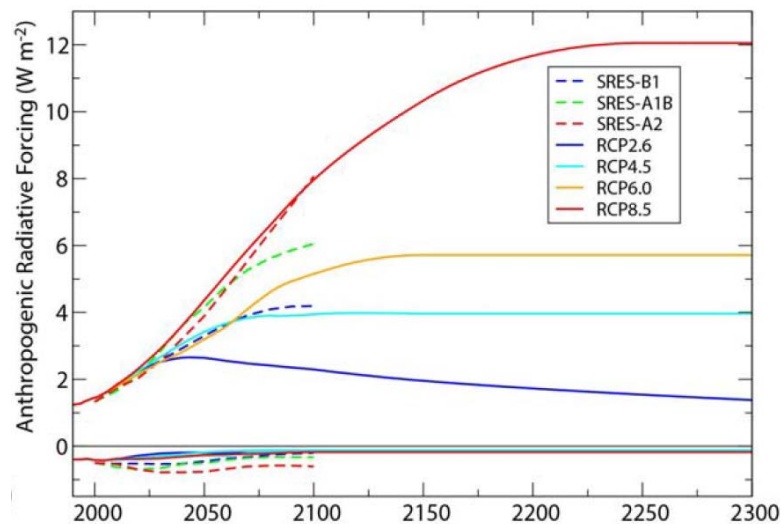
Figuur 3.3: Opgetreden wereldgemiddelde zeespiegelstijging over de periode 1700 – 2000 (figuur 13.27 uit het IPCC WGI Rapport)

4 Toekomst scenario's voor forcering en temperatuur

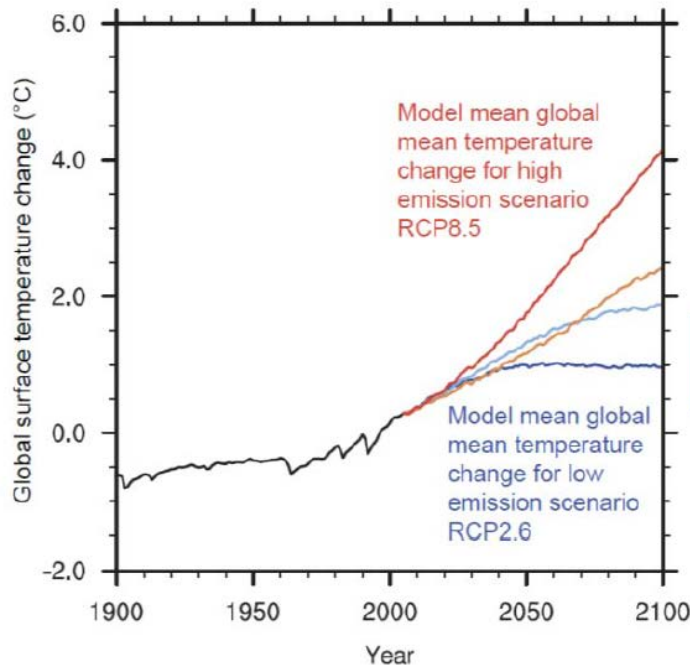
In IPCC 2013 wordt gebruik gemaakt van nieuwe scenario's die niet 1 op 1 te vergelijken zijn met de eerdere scenario's. Voor het IPCC 2013 wordt gebruik gemaakt van forcering scenario's die in 2100 een bepaalde forceringswaarde bereiken, namelijk 2.6 , 4.5, 6.0 en 8.5 Watt per vierkante meter (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 en RCP 8.5). Voor het eerst worden ook scenario's meegenomen waarbij maatregelen om de forcering te beperken zijn meegenomen. De naar mijn mening meest waarschijnlijke scenario's RCP 4.5 en RCP 6.0 zijn tot 2075 vergelijkbaar, daarna is RCP 6.0 duidelijk hoger (figuur 4.1). Beide scenario's zijn tot 2075 en voor scenario RCP 4.5 tot 2100 vergelijkbaar met het oude scenario SRES-B1. Het scenario RCP 8.5 is vergelijkbaar met het oude scenario SRES-A2. Een oud scenario vergelijkbaar met RCP 2.6, waarin sterke maatregelen genomen worden om de forcering te beperken bestaat niet. De resulterende uitkomsten voor de temperatuur staan weergegeven in figuur 4.2.

De beschouwde periode voor de scenario's is helaas anders dan in AR4 (IPCC 2007). In IPCC 2013 worden de verschillen beschouwd tussen de periode 2081–2100 en de periode 1986–2005, dus tussen ongeveer 1995 en 2090 een periode van 95 jaar. In AR4 werden de perioden 2090–2099 en de periode 1980–1999 gehanteerd, ongeveer 1990 – 2095 een periode van 105 jaar. Dit maakt de vergelijking van de resultaten uit IPCC 2013 met IPCC 2007 lastig. De scenario waarden voor de temperatuurstijging voor de periode 2081–2100 ten opzichte van de periode 1986–2005 zijn:

- 0.3°C to 1.7°C (RCP2.6),
- 1.1°C to 2.6°C (RCP4.5),
- 1.4°C to 3.1°C (RCP6.0),
- 2.6°C to 4.8°C (RCP8.5).



Figuur 4.1: RCP Scenario's van het IPCC 2013 in vergelijking met de scenarios van AR4 (IPCC 2007) voor de forcering (figuur 12.3 uit het IPCC WGI Rapport).



Figuur 4.2: Temperatuurverloop volgens de scenario's RCP 2.6 (donker blauw), RCP 4.5 (licht blauw), RCP 6.0 (oranje) en RCP 8.5 (rood) (FAQ 12.1, Figuur 1: uit het IPCC WGI Rapport)

5 Toekomst scenario's voor zeespiegelstijging

KNMI:

Zeespiegelveranderingen in de toekomst

27 september 2013

Caroline Katsman en Hylke de Vries (KNMI)

Het toekomstige zeeniveau wordt berekend met behulp van klimaatmodellen. Klimaatmodellen zijn vergelijkbaar met de computermodellen die worden gebruikt voor de weersverwachtingen, alleen willen we nu een eeuw of langer vooruit kijken. Berekeningen met klimaatmodellen worden gedaan voor verschillende toekomstscenario's, met een hoge en een lage uitstoot van broeikasgassen, bijvoorbeeld.

Hoe groot zal de wereldgemiddelde zeespiegelstijging zijn in 2100?

Volgens het IPCC (klimaatpanel van de Verenigde Naties) zal de zeespiegel gedurende de 21e eeuw wereldwijd met 26 tot 82 centimeter stijgen (2081-2100 t.o.v. 1986-2005). Dit is het gevolg van:

- de uitzetting van het zeewater
- het smelten van gletsjers en kleine ijskappen
- het gestage slinken van de grote ijskappen op Groenland en Antarctica
- toenemende sneeuwval op Antarctica
- afkalving aan de randen van de Groenlandse en de West-Antarctische ijskap
- minder opslag van water op land.

Met hoeveel zeespiegelstijging krijgt Nederland waarschijnlijk te maken in de 21e eeuw?
Regionale veranderingen in zeespiegel kunnen sterk afwijken van het wereldgemiddelde.

Voor de Nederlandse kust houden de KNMI'06 scenario's rekening met een zeespiegelstijging van 35 tot 85 centimeter in 2100 ten opzichte van het niveau van 1990 (Verder Lezen / KNMI'06 Zeespiegelstijging). De stijging is afhankelijk van de stijging van de atmosfeer temperatuur. Daarnaast moeten we in ons land nog rekening houden met bodemdaling.

scenario(jaar)	temperatuursverandering	zeespiegelstijging
gematigd(2100)	+2 C	35-60 cm
warm(2100)	+4 C	40-85 cm

De KNMI'06 scenario's zijn nog gebaseerd op modelberekeningen gepresenteerd in het 4e IPCC Assessment Rapport (2007). In het voorjaar van 2014 presenteert het KNMI nieuwe zeespiegelscenario's voor Nederland gebaseerd op het 5e IPCC Assessment Rapport.

Kan de zeespiegelstijging ook extremer zijn dan aangegeven in de KNMI'06 scenario's?

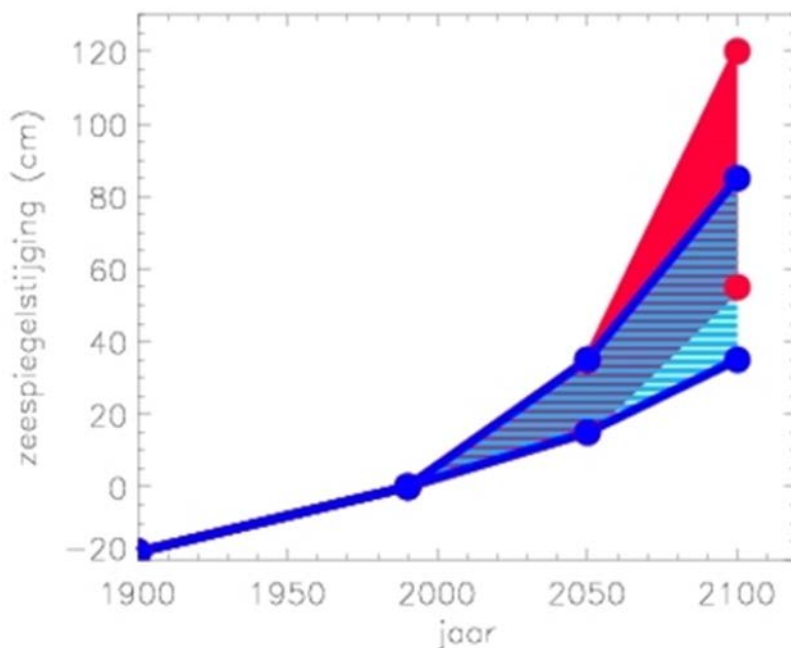
De KNMI'06 scenario's beschrijven de bandbreedte van meest waarschijnlijke uitkomsten. Op 3 september 2008 is het advies van de Deltacommissie gepresenteerd. Het Deltacommissie scenario voor de zeespiegelstijging (Verder Lezen / Deltacommissie scenario) schetst een 'plausibele bovengrens' van de mogelijkheden. Het is een voorbeeld van een extreem 'kleine kans - grote gevolgen' scenario, in aanvulling op de KNMI'06 scenario's. Voor sommige vraagstukken (zoals de veiligheid tegen overstromingen op de lange termijn) is het zinvol om uit te gaan van een dergelijk extreem scenario.

Het Deltacommissie scenario voor de zeespiegelstijging in 2100 bedraagt 120 cm (exclusief 10 cm bodemdaling). Dit wijkt fors af van het hoogste KNMI'06 scenario van 85 cm (Figuur 2).

Het scenario voor de zeespiegelstijging dat de Deltacommissie presenteert is gebaseerd op een ander uitgangspunt dan de KNMI'06 scenario's. De analyse richt zich nadrukkelijk op de bovengrens van de mogelijkheden onder gedane aannames in plaats van op de bandbreedte van meest waarschijnlijke uitkomsten:

- Het Deltacommissie scenario is gebaseerd op een wereldwijde opwarming tot 6 C in 2100 terwijl de KNMI scenario's rekenen met hooguit +4 C in 2100. Dit resulteert in een extra zeespiegelstijging door extra uitzetting van zeewater van ongeveer 15 cm.
- Het overige deel van het verschil (20 cm) komt doordat de bijdragen van de ijskappen op Groenland en Antarctica gebaseerd zijn op de extremere extrapolatie van recente observaties.

Figuur 2: Scenario's voor zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor de 21e eeuw (blauw: KNMI '06 scenario, rood: bovengrensscenario Deltacommissie)



Wat zijn semi-empirische scenario's voor zeespiegelstijging?

Naast de scenario's voor zeespiegelstijging gebaseerd op studies met klimaatmodellen zijn er recent ook een aantal scenario's gepubliceerd op basis van de extrapolatie van metingen van de zeespiegelstijging uit het (recente) verleden. Bij deze zogenaamde semi-empirische methodes wordt er van uitgegaan dat de nu waargenomen relatie tussen atmosfeer temperatuur en zeeniveau (of het tempo van verandering daarin, er zijn verschillende aannames gesuggereerd en gebruikt in de diverse studies) ook in de toekomst geldig blijft. Op basis van scenario's voor de temperatuurstijging (uit klimaatmodellen) en zo'n specifieke semi-empirische relatie gebaseerd op waarnemingen kan ook een scenario voor de zeespiegelstijging worden geconstrueerd. Over het algemeen vallen deze schattingen hoger uit dan de scenario's op basis van klimaatmodellen. De semi-empirische methodes zijn bekritiseerd vanwege hun zwakke fysische basis (het complexe klimaatsysteem wordt gerepresenteerd door een simpele relatie) en verder onderzoek is nodig om de resultaten ervan op waarde te kunnen schatten.

Wat zijn de verwachtingen voor de verre toekomst?

Oceanen en ijskappen reageren erg traag op veranderingen in de atmosfeer. Daarom zal de zeespiegelstijging nog eeuwen doorzetten, zelfs als de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer beperkt blijft.

De Groenlandse ijskap zal in dit warmere klimaat blijven slinken en dus bijdragen aan zeespiegelstijging. Modelstudies suggereren dat bij een gematigde stijging van de temperatuur de ijskap vrijwel geheel zal verdwijnen in enkele duizenden jaren. De Antarctische ijskap blijft zo koud dat het oppervlak nauwelijks zal gaan smelten. In modelstudies neemt de sneeuwval toe, waardoor de ijskap de komende eeuwen gaat groeien. Echter, de ijskap kan netto massa verliezen wanneer blijkt dat de afkalving aan de randen dominant is.

De totale zeespiegelstijging voor het jaar 2300 wordt geschat op ongeveer 0.4 tot 3.6 meter, en is sterk afhankelijk van het aangenomen emissiescenario.

Waarom kan de zeespiegelstijging niet exact voorspeld worden?

Hoeveel de zeespiegel zal stijgen in de komende eeuw(-en) hangt sterk af van:

- de stijging van de luchttemperatuur, omdat die voornamelijk bepaalt hoe snel het landijs smelt en hoe snel en waar de oceanen zullen opwarmen.
- de hoeveelheid broeikasgassen die door de mens in de atmosfeer wordt uitgestoten, omdat die bepaalt hoe sterk de luchttemperatuur zal stijgen.

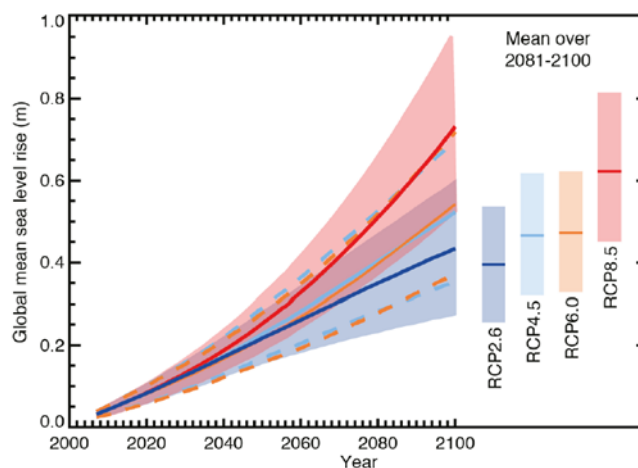
Omdat de menselijke uitstoot een onzekere factor is worden de stijging van de luchttemperatuur en van de zeespiegel berekend voor verschillende scenario's voor de uitstoot, variërend van een scenario met sterke economische groei en veel gebruik van fossiele brandstoffen tot een scenario met wereldwijde aanpak van milieuproblemen. Hoe groter de stijging van de luchttemperatuur is, hoe groter ook de zeespiegelstijging.

De grote spreiding in de schatting voor de zeespiegelstijging voor het jaar 2100 is niet alleen een gevolg van het rekenen met verschillende toekomstscenario's. De klimaatmodellen waarmee deze berekeningen worden gedaan zijn het soms ook oneens met elkaar. Bepaalde natuurkundige processen zijn (nog) moeilijk in een model te representeren, zodat nog niet precies bekend is hoe groot hun bijdrage aan de zeespiegelstijging op een bepaald moment is.

De toekomst scenario's voor zeespiegelstijging volgens het IPCC 2013 staan weergegeven in figuur 5.1. De gekleurde balken aan de rechter kant geven de verwachtingswaarde per scenario plus de bijbehorende onzekerheden, dit betreft de zeespiegelstijging in de periode 2081–2100 ten opzichte van de periode 1986–2005. Tabel 5.1 geeft hiervan de getalswaarden.

Tabel 5.1 getalswaarden voor de zeespiegelstijging ten opzichte van de periode 1986-2005

Scenario	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Stijging in 2081-2100	0.40(0.26-0.54)	0.47(0.32-0.62)	0.47(0.33-0.62)	0.62(0.45-0.81)
Stijging in 2046-2065	0.24(0.17-0.31)	0.26(0.19-0.33)	0.25(0.18-0.32)	0.29(0.22-0.37)
Stijging in 2100	0.43(0.28-0.60)	0.52(0.35-0.70)	0.54(0.37-0.72)	0.73(0.53-0.97)



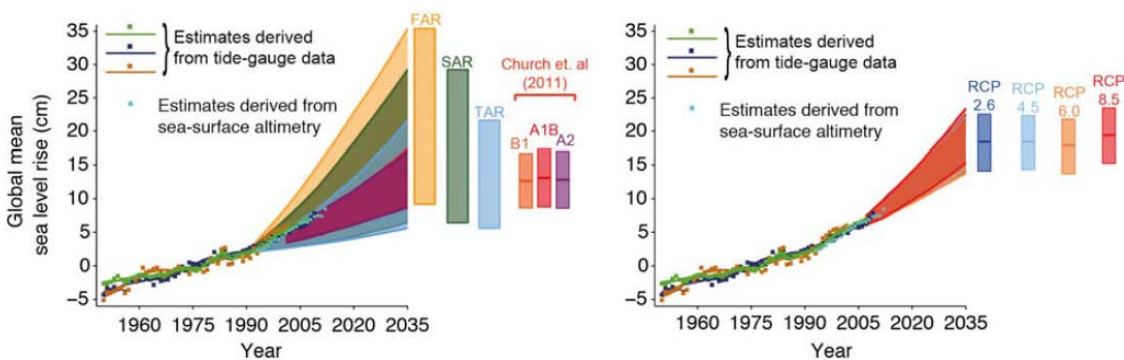
Figuur 5.1: Verloop zeespiegel volgens de scenario's RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 en RCP 8.5 (figuur TS 22 uit het IPCC WGI Rapport)

De stijging in 2100 voor de scenario's RCP 4.5 en 6.0 is vrijwel hetzelfde ondanks dat de forcering in 2100 anders is (30 % hoger). Dit is te verklaren door het verloop van de forcering, voor het scenario 4.5 begint deze relatief sneller te stijgen en na 2050 minder snel te stijgen ten opzichte van scenario 6.0, zie figuur 4.1. Dit is ook duidelijk in het temperatuurverloop te zien (figuur 4.2), tussen 2010 en 2075 is deze lager voor scenario 6.0 dan voor scenario 4.5. Door de tragere reactie van de zeespiegelstijging ligt dit snijpunt (dat scenario 6.0 hoger is dan RCP 4.5) voor de zeespiegelstijging rond 2100.

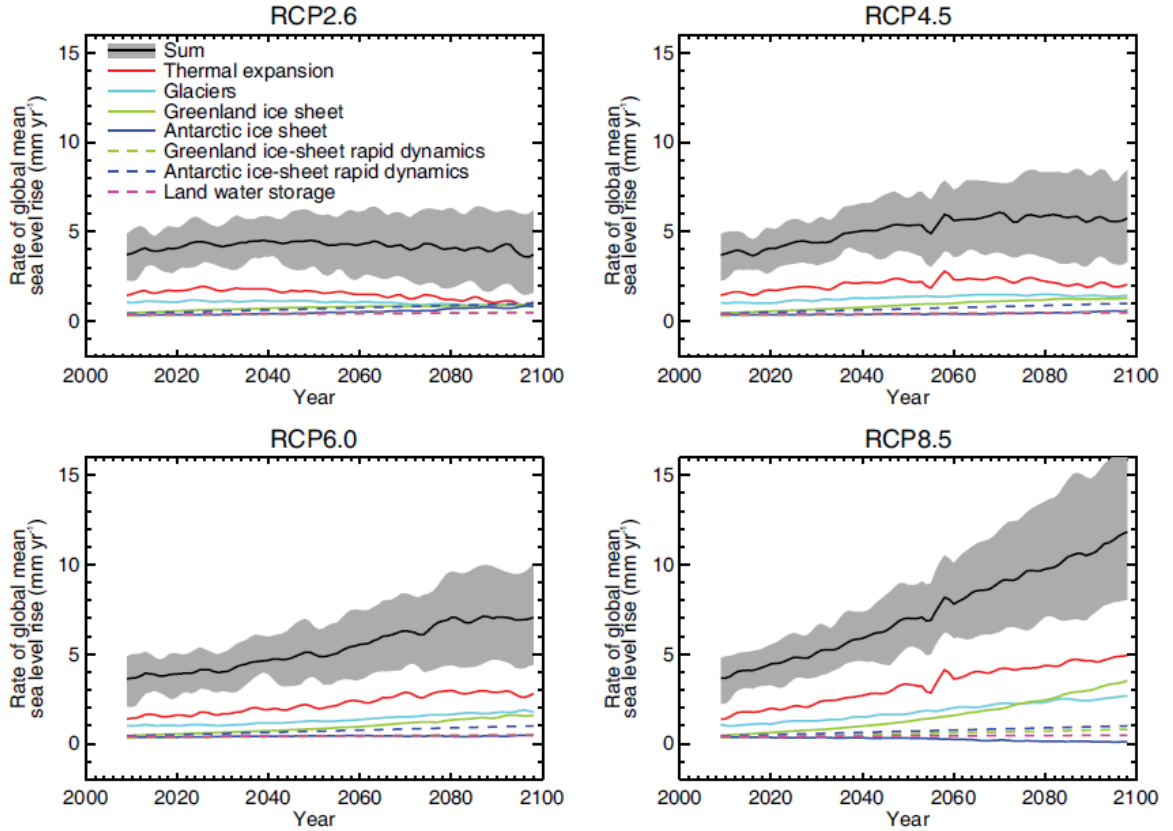
In figuur 5.2 is een vergelijking gegeven voor zeespiegelstijging volgens de verschillende IPCC rapporten. In het eerste rapport (FAR) zijn de waarden relatief hoog, waarna ze in het tweede (SAR) en derde rapport (TAR) wat lager worden. Het IPCC 2013 rapport met de RCP scenario's geeft weer wat hogere waarden.

Deze worden veroorzaakt door de hogere schattingen ten aanzien van het smelten van de ijskappen. In de KNMI scenario's 2006 waren deze hogere schattingen voor de ijskappen al meegenomen. Daarom zijn de KNMI 2006 scenario's vergelijkbaar van grootte ten opzichte van de IPCC 2013 resultaten. In het voorjaar van 2014 komt het KNMI met nieuwe scenario's voor Nederland naar buiten. Voor zeespiegelstijging zullen deze waarschijnlijk niet of nauwelijks afwijken van de 2006 scenario's

Naast het verloop van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging geeft het IPCC 2013 ook informatie over de snelheid van stijging. Figuur 5.3 geeft daarvan de resultaten.



Figuur 5.2 Vergelijking tussen de verschillende IPCC rapporten van de diverse scenario's voor zeespiegelstijging (TFE 3 figuur 1 uit het IPCC Summary for policy makers)



Figuur 5.3 Snelheid van zeespiegelstijging voor de 4 scenario's. (figuur 13.11b uit het IPCC WGI Rapport)

Voor alle scenario's is de stijging van de zeespiegel in 2010 3,7 mm per jaar. Deze waarde is ten opzichte van de stijging over de periode 1900 – 2010 met 1,7 mm per jaar erg hoog. Zelfs is deze hoog ten opzichte van de satellietwaarnemingen met 3,2 mm per jaar, zeker als we ook in beschouwing nemen dat de waarde van 3,2 mogelijk door fluctuaties veroorzaakt wordt en niet door de versnelling van de zeespiegelstijging. Zie ook figuur 3.1, een verloop dat start in 2010 met 3,7 mm/jaar sluit daarop slecht aan.

6 Toekomst scenario's voor regionale zeespiegelstijging

KNMI

Het ontwikkelen van scenario's voor regionale zeespiegelstijging

27 september 2013

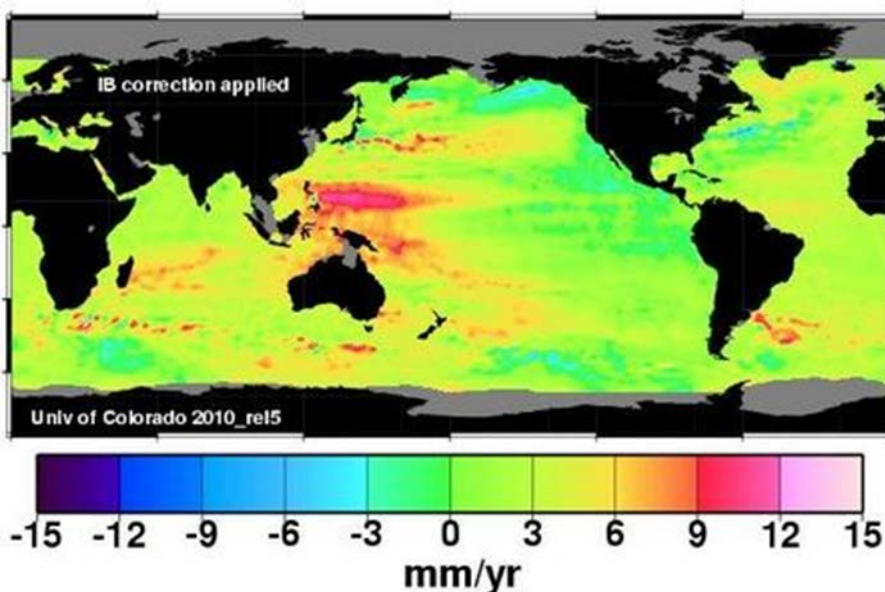
C. Katsman (KNMI), A. Slangen (IMAU/UU), R. van de Wal (IMAU/UU), B. Vermeersen, R. Riva (TU Delft)

Hoewel je het niet zou vermoeden op een windstille dag is de zee helemaal niet vlak als een spiegel: het zeeniveau is een heuvelslandschap met hoogteverschillen van honderden meters. Ook de toekomstige veranderingen als gevolg van de opwarming van het klimaat zullen niet overal even groot zijn. In een gezamenlijke studie presenteren onderzoekers van de Universiteit Utrecht, KNMI en TU Delft daarom een klimaatscenario voor de regionale zeespiegelverandering in de eenentwintigste eeuw. Zoals verwacht laten de uitkomsten grote regionale verschillen zien. Een goede schatting voor de toekomstige bijdrage van de ijskappen op Groenland en Antarctica blijkt cruciaal voor een betrouwbaar resultaat.

Satellietmetingen

Satellieten brengen sinds 1992 de lokale variaties in het zeeniveau in detail in kaart (figuur 1). Over die periode is het wereldgemiddelde zeeniveau gestegen met ongeveer 3 millimeter per jaar. Maar er zijn gebieden waar de stijging over die periode veel groter was (bijvoorbeeld bij Indonesië) en ook gebieden waar de zeespiegel is gedaald in die tijd (bij Alaska en langs de Amerikaanse westkust). Ook voor de toekomst verwachten we geen uniforme stijging van het zeeniveau in reactie op de opwarming van de aarde.

Figuur 1: Trend in zeeniveau gemeten door satellieten (in millimeters per jaar) gemiddeld over 1993-2010. De wereldgemiddelde stijging over deze periode bedraagt 3 millimeter per jaar [bron: University of Colorado, VS]



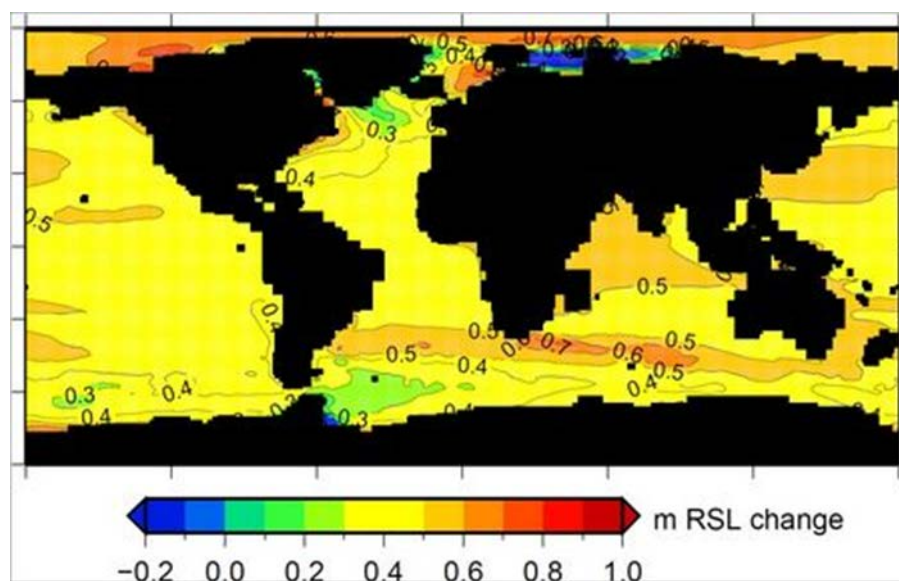
Regionale zeespiegelveranderingen

Naast de bekende klimaatscenario's voor de wereldgemiddelde zeespiegelstijging (zoals onder meer gepubliceerd in het 4e Assessment Report van het Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC 4AR) is het daarom belangrijk om regionale zeespiegelverwachtingen te maken. Een gezamenlijke studie van de Universiteit Utrecht, KNMI en TU Delft beschrijft een belangrijke eerste stap in die richting. In deze regionale verwachting wordt de wereldgemiddelde bijdrage van het uitzetten van de oceaan door opwarming (thermische expansie) en het smelten van gletsjers over de gehele aarde en de ijskappen op Groenland en Antarctica berekend op een vergelijkbare wijze als in het IPCC 4AR rapport. Daarnaast wordt rekening gehouden met effecten die van invloed zijn op de lokale zeespiegel: regionale variaties in uitzetting gerelateerd aan veranderingen in oceaanstromingen, verticale landbewegingen als gevolg van het verdwijnen van ijs sinds de laatste ijstijd, en het zogenaamde zelfgravitatie effect.

** In de KNMI'06 klimaatscenario's voor Nederland zijn het zelfgravitatie effect en verticale landbewegingen als gevolg van het verdwijnen van ijs sinds de laatste ijstijd (nog) niet meegenomen.*

Figuur 3 laat de berekende regionale zeespiegelverandering voor het jaar 2100 ten opzichte van het niveau van 1990 zien. Volgens dit klimaatscenario bedraagt de wereldgemiddelde stijging 47 centimeter. Maar in het Arctisch gebied en in de subtropen op het Zuidelijk Halfrond verwachten we een zeespiegelstijging die enkele decimeters hoger is. Bij het Antarctisch Schiereiland en in het noorden van de Atlantische Oceaan stijgt het zeeniveau naar verwachting minder dan gemiddeld, of daalt deze zelfs. Voor de West-Europese kust is de verwachte stijging iets groter dan gemiddeld.

Figuur 3: Kaart van de verwachte verandering in het lokale zeeniveau in het jaar 2100 ten opzichte van het niveau van 1990. Gemiddeld over alle oceanen bedraagt de stijging volgens dit klimaatscenario (gebaseerd op het SRES A1B emissiescenario) 47 centimeter [bron: Slangen et al., 2011].



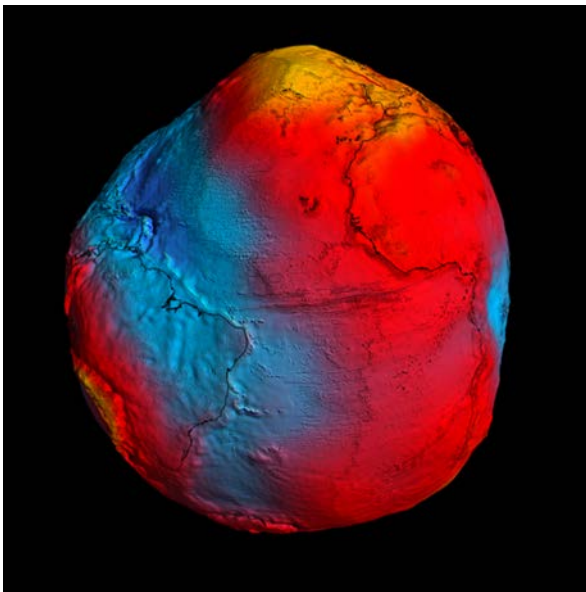


Oorzaken

De belangrijkste oorzaken voor lokale verschillen in zeeniveau zijn de aanwezigheid van oceaanstromingen en regionale variaties in het zwaartekrachtsveld van de aarde. Het zwaartekrachtsveld van de aarde bepaalt de ruststand van het zeeoppervlak.

Omdat het gewicht van het gesteente in de aardmantel (en in mindere mate in de aardkorst) en de erdoor veroorzaakte topografiebijdragen niet overal gelijk zijn, is deze ruststand (de geïde genaamd) verre van vlak (figuur 4). Waar het zwaartekrachtsveld sterker dan gemiddeld is, is het zeeniveau hoog (het water wordt naar die plek toe getrokken) en omgekeerd. De heuvels en dalen in de geïde lopen op tot wel 100 meter.

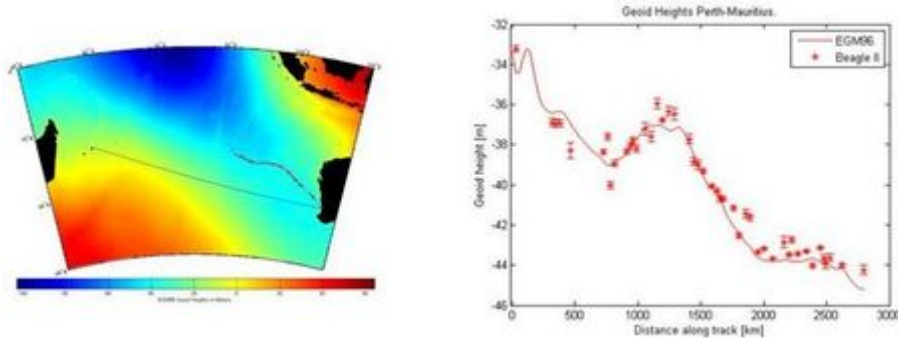
Figuur 4: Geïde (ruststand van het zeeoppervlak voor een aarde zonder continenten) gemeten door de Europese GOCE satelliet. De kleuren representeren hoogteverschillen van -100 m (blauw) tot +100 m (geel) [bron: ESA]



Ook oceaanstromingen zijn geassocieerd met variaties in het zeeniveau. Analoog aan de situatie in de atmosfeer, waar aardrotatie en hoge- en lagedrukgebieden de windrichting en windsterkte bepalen, zijn oceaanstromingen onlosmakelijk verbonden met variaties in zeehoogte. Voor sterke stromingen is het hoogteverschil een paar meter.

Deze variaties in het zeeniveau dempen niet uit zoals golven in een badkuip, maar zijn altijd aanwezig. Dit wordt gemeten met satellieten, maar is ook te meten met een GPS-ontvanger op een boot, net zoals je met een GPS-ontvanger ook de hoogte tijdens een bergwandeling kunt bepalen. Zo voer de clipper 'Stad Amsterdam' in maart 2010 over de Indische Oceaan van Perth, Australië naar Mauritius aan de oostkust van Afrika. Over dit traject daalde het zeilschip eerst van -33 meter naar -45 meter, en steeg vervolgens naar +10 meter ten opzichte van het gebruikte referentievlak (figuur 5). Over dit traject in de Indische Oceaan heeft het oceaanooppervlak dus een diep dal.

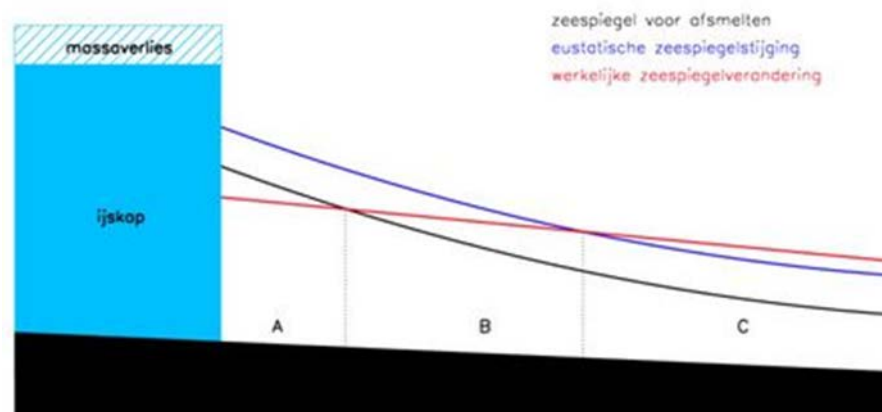
Figuur 5: GPS-metingen van het zeeniveau gedaan aan boord van de clipper "Stad Amsterdam" ("BEAGLE II") over een 2800 km lang traject in de Indische Oceaan van Perth richting Mauritius (rode kruisjes). De kleuren op de kaart en de rode lijn in de grafiek representeren de oceaanhoogte zoals gemeten met satellieten. De grilligheid van de GPS-metingen in de grafiek is met name te wijten aan de hoge golven die de clipper te verduren kreeg in de zuidelijke Indische Oceaan [bron: B. Vermeersen en H. van der Marel (TU Delft) / Fugro Leidschendam].



Zelfgravitatie

Smeltwater afkomstig van landijs zal zich niet evenredig verdelen over de oceanen, als gevolg van het zogenaamde zelfgravitatie effect. Het zeeniveau is relatief hoog in de buurt van een ijskap omdat het water door de zwaartekracht naar de op het land liggende ijsmassa toe getrokken wordt (figuur 6). Wanneer (een deel van) het landijs smelt, verdwijnt ook (een deel van) de aantrekkende werking ervan op het zeewater. Daarom zal de zeespiegel gemiddeld over de oceaan stijgen, maar zal deze ook kantelen. Het netto effect van het smelten van landijs en het bijbehorende zelfgravitatie effect is dat er in een gebied dicht bij de ijskap (gebied A in figuur 6) zeespiegeldaling plaatsvindt. Verder van de ijskap (gebied B) treedt wel zeespiegelstijging op maar deze is minder groot dan de wereldgemiddelde stijging. Ver van de ijskap (gebied C) is de zeespiegelstijging groter dan gemiddeld.

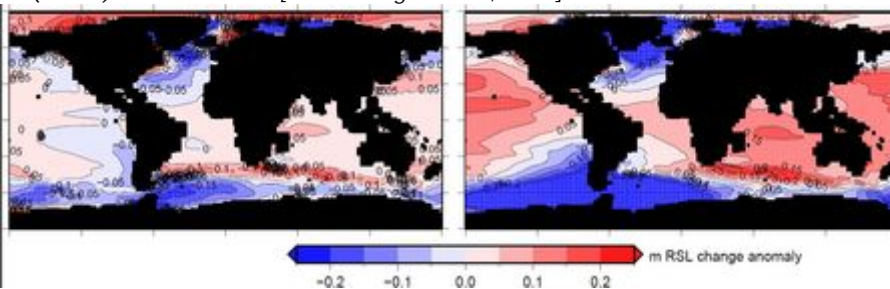
Figuur 6: Illustratie van het effect van zelfgravitatie op de lokale zeespiegel. Zwart: oorspronkelijke zeespiegel, blauw: wereldgemiddelde (eustatische) zeespiegelstijging als gevolg van het smelten van de ijskap, rood: werkelijke zeespiegelverandering door het zelfgravitatie effect. Het zelfgravitatie effect zorgt alleen voor een herverdeling van het smeltwater. Gebied A strekt zich uit tot een afstand van ongeveer 2200 kilometer van de ijskap, gebied B tot een afstand van ongeveer 6700 km. Als de ijskap in de figuur Groenland voorstelt dan ligt Nederland in gebied B. Als de ijskap in de figuur Antarctica voorstelt dan ligt Nederland in gebied C [bron: C. A. Katsman/KNMI en Bert Vermeersen/TU Delft].



Bijdrage ijskappen

De meest onzekere bijdrage in berekeningen van de toekomstige zeespiegelveranderingen is die van de ijskappen van Groenland en Antarctica. Over de afgelopen 10 tot 15 jaar hebben de ijskappen meer en meer massa verloren. De bijdrage gepresenteerd in IPCC 4AR, gebaseerd op metingen tot het jaar 2006, is daarom misschien een onderschatting van de ijsbijdrage die we deze eeuw kunnen verwachten. Ter onderbouwing van het rapport van de nieuwe Deltacommissie (commissie Veerman) heeft een internationaal team van experts recent een 'extreem' zeespiegelscenario ontwikkeld. In dit extreme klimaatscenario is vooral de bijdrage van de ijskappen hoger geschat dan in IPCC 4AR (20 tot 60 centimeter in plaats van 10 tot 20 centimeter). Een dergelijk grote landijsbijdrage resulteert niet alleen in een veel hogere schatting voor de verwachte wereldgemiddelde stijging van het zeeniveau, maar beïnvloedt ook het regionale patroon als gevolg van het zelfgravitatie-effect (figuur 7). Wanneer de bijdrage van de ijskappen groot is zal het zeeniveau in de buurt van de ijskappen relatief laag zijn, en extra stijgen in de tropen. Bij de West-Europese kust voorziet dit klimaatscenario met een extreme ijskapbijdrage in een lager dan gemiddelde zeespiegelstijging. De berekende veranderingen in het zeeniveau zijn dus zeer gevoelig voor de aangenomen toekomstige bijdrage van de ijskappen op Groenland en Antarctica. Voor Nederland maakt het veel uit voor de verwachting van het toekomstige zeeniveau of de afsmelting veroorzaakt wordt door het kleiner worden van Groenland of door het kleiner worden van Antarctica. Voor betrouwbare regionale verwachtingen zijn goede schattingen van beide bijdragen daarom cruciaal.

Figuur 7: Kaart van de verwachte afwijking van het lokale zeeniveau ten opzichte van de gemiddelde stijging over 1990-2100, voor een klimaatscenario met een (links) kleine en (rechts) grote bijdrage van de ijskappen van Groenland en Antarctica. De bijbehorende wereldgemiddelde stijging bedraagt respectievelijk (links) 47 centimeter en (rechts) 102 centimeter [bron: Slangen et al., 2011].

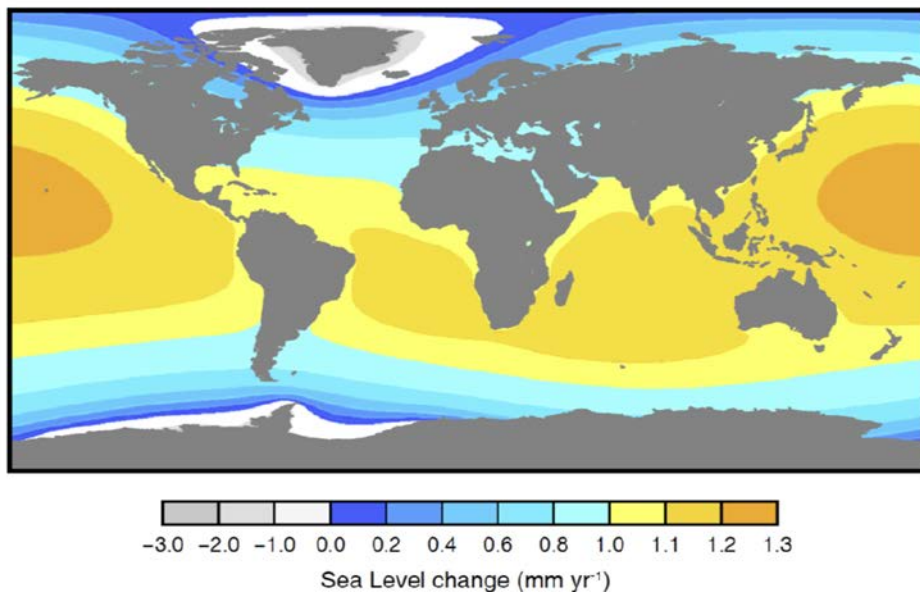


Literatuur

- Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios, A.B.A. Slangen, C.A. Katsman, R.S.W. van de Wal, L.L.A. Vermeersen, R.E.M. Riva, Climate Dynamics, 2011, doi: 10.1007/s00382-011-1057-6
- Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example, C. A. Katsman, A. Sterl, J. J. Beersma, H. W. van den Brink, J. A. Church, W. Hazeleger, R. E. Kopp, D. Kroon, J. Kwadijk, R. Lammersen, J. Lowe, M. Oppenheimer, H.-P. Plag, J. Ridley, H. von Storch, D. G. Vaughan, P. Vellinga, L. L. A. Vermeersen, R. S. W. van de Wal, R. Weisse, Climatic Change, 2011, doi: 10.1007/s10584-011-0037-5.

Zelfgravitatie

In aanvulling op het bovenstaande ten aanzien van zelfgravitatie is in figuur 6.1 een aansprekend voorbeeld gegeven van de verandering van de geoïde ten gevolge van het gedeeltelijk smelten van de ijskappen. De stijging in Nederland is voor dit onderdeel kleiner dan het wereld gemiddelde, bij Groenland is dan sprake van een zeespiegeldaling (ten gevolge van dit onderdeel).



Figuur 6.1 Regionale absolute zeespiegelverandering veroorzaakt door veranderingen in de zwaartekracht veroorzaakt door het smelten van de ijskappen resulterend in een wereldgemiddelde stijging van 10 cm/eeuw. (FAQ 13.1 Figuur 2 uit het IPCC WGI Rapport)

Postglaciale opheffing (GIA)

De beschrijving van het KNMI gaat over de regionale absolute zeespiegelstijging om tot de relatieve zeespiegelstijging te komen dient de bodemdalingscomponent nog toegevoegd te worden. Naast tektonische bodembewegingen en bodemdaling door gas en zoutwinning is de zogenaamde GIA de belangrijkste component. GIA staat voor Glacial Isostatic Adjustment ook wel Glacial Rebound genoemd. In het Nederlands wordt dit de Postglaciale opheffing genoemd. Na het verdwijnen van de ijskappen in Scandinavië en Schotland “veert” de aarde daar terug en is er sprake van bodemstijging. In Nederland zorgt deze terugvering juist voor bodemdaling omdat tijdens de ijstijd de bodem door de ijskappen juist iets omhoog geperst werd. Als je een steen in de modder duwt komt daaromheen de modder iets omhoog. Na het verdwijnen van de ijskappen gebeurt nu in Nederland het tegenovergestelde, bodemdaling dus. Over de gehele wereld ziet dit plaatje eruit zoals getoond in figuur 6.2. Vooral rondom de Noordzee is het patroon ingewikkeld en de variatie relatief groot. De noordelijke Noordzee laat bodemstijging zien en het zuiden bodemdaling. Figuur 6.3 laat eveneens de resultaten voor GIA zien van twee verschillende modellen voor het gebied rondom de Noordzee. De verschillen tussen beide modellen veroorzaken een verschil in relatieve zeespiegelstijging van enkele cm’s per eeuw.

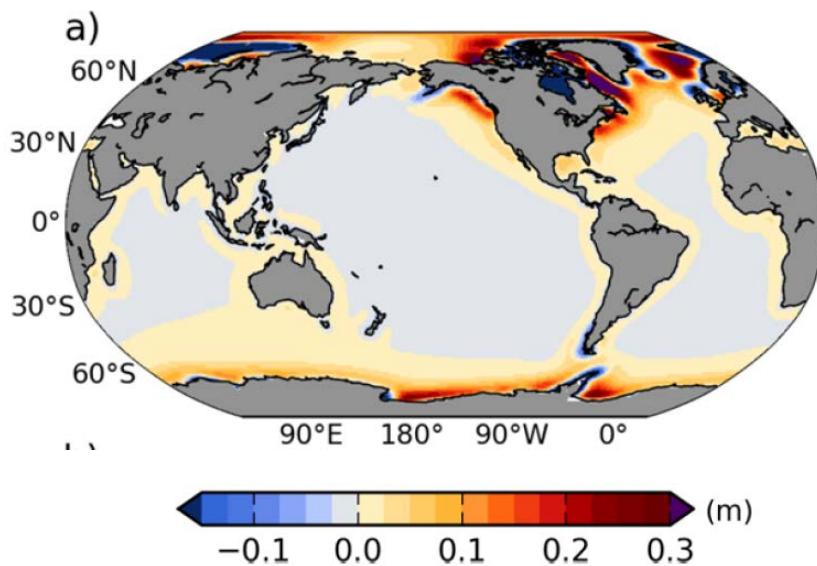
Volgens het Peltier model en het Paulson model varieert de GIA sterk langs de Nederlandse kust (tussen de 0 cm per eeuw rondom Vlissingen en 4 cm per eeuw rondom Terschelling)



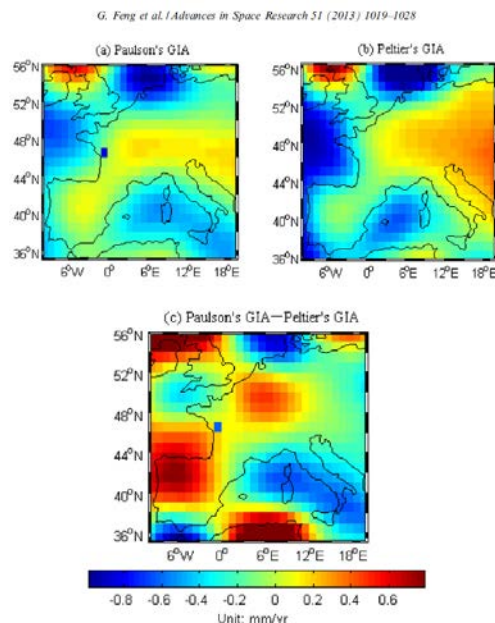
In Deltares, 2010 is het model van Kooi e.a. 1998 (zie figuur 6.4) gebruikt, die weer een geheel ander beeld laat zien.

Als het Peltier model juist is zou de relatieve zeespiegelstijging rondom de Wadden ongeveer 4 cm per eeuw groter moeten zijn dan in het zuiden van Nederland. De waarnemingen (Deltares, 2010) duiden eerder op het tegenovergestelde.

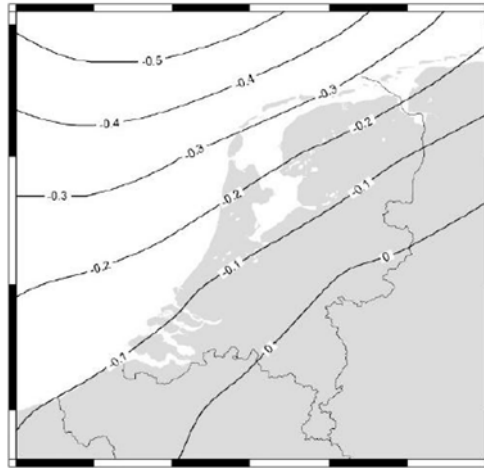
Gezien de grote onzekerheden is nader onderzoek wenselijk. Aan de TU Delft doet de vakgroep van Bert Vermeersen hier onderzoek naar.



Figuur 6.2: GIA, verandering in bodemhoogte ten gevolge van het verdwijnen van de ijskappen (o.a Scandinavië en Schotland) na de vorige ijstijd volgens het model van Peltier (Figuur 13.18a uit het IPCC WGI Rapport)

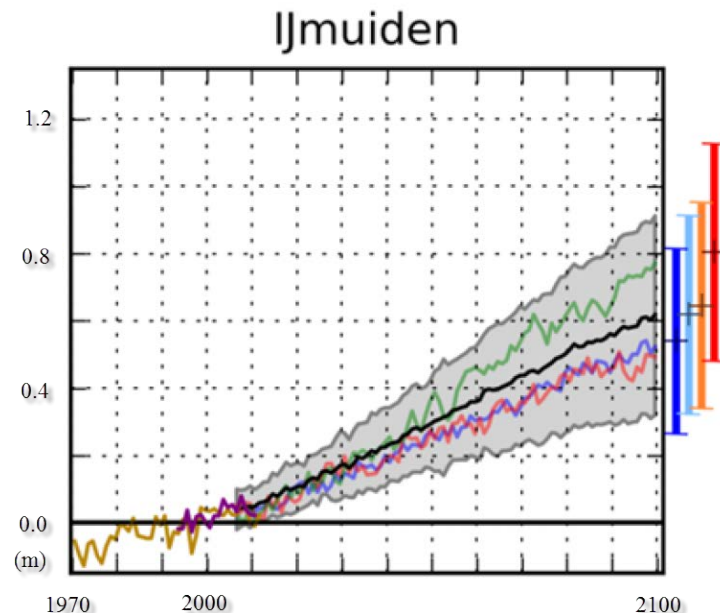


Figuur 6.3: GIA rondom de Noordzee volgens de modellen van Peltier en Paulson en hun verschillen (Feng e.a., 2013)



Figuur 6.4: GIA volgens Kooi e.a., 1998)

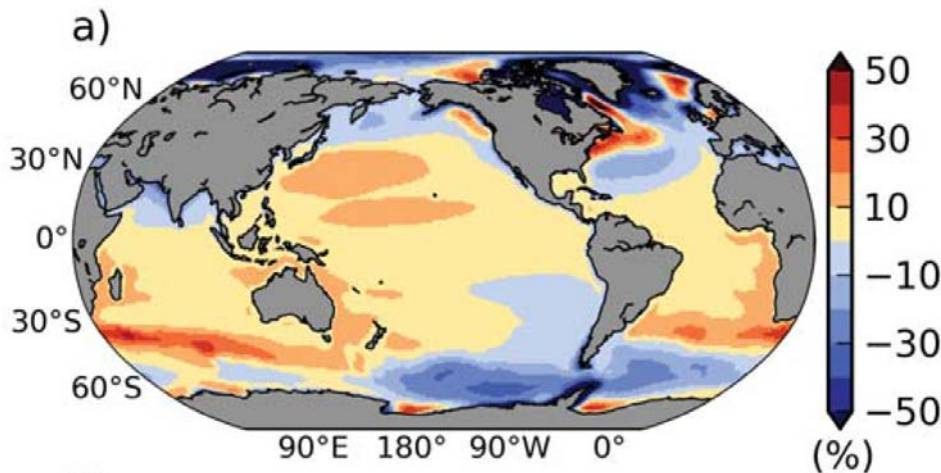
In het IPCC rapport staan de uitkomsten voor de relatieve zeespiegelstijging (incl. GIA) gegeven voor IJmuiden (figuur 6.5) voor het scenario RCP 4.5. De wereldgemiddelde waarde voor 2100 voor scenario RCP 4.5 bedraagt 52 cm (35-70). De waarde voor IJmuiden bedraagt ongeveer 60 cm/eeuw, waarvan 1,5 cm per eeuw door GIA (Wahl e.a., 2013). Het verschil van ongeveer 6 cm is veroorzaakt door de regionale verschillen in de absolute zeespiegelstijging (veranderingen in de geoid) door veranderingen in het zwaartekrachtsveld, veranderingen in de temperatuur en veranderingen in de zoutgehalten.



Figuur 6.5: Relatieve zeespiegelstijging IJmuiden voor scenario RCP 4.5 (zwarte lijn en grijze band). De rode, blauwe en groene lijn zijn uitkomsten van enkele willekeurige modellen. De gekleurde balen aan de rechter kant geven de 4 scenario's aan met de stijging tussen de periode 2081–2100 ten opzichte van de periode 1986–2005 (Figuur 13.23 uit het IPCC WGI Rapport).



Tenslotte staat in figuur 6.6 de verdeling weergegeven van de afwijkingen van de regionale zeespiegelstijging ten opzichte van de gemiddelde zeespiegelstijging weergegeven tussen de periode 2081–2100 ten opzichte van de periode 1986–2005. Het patroon in de Noordzee lijkt sterk op het patroon van de GIA (figuur 6.2) en wordt hierdoor blijkbaar voor een groot gedeelte door bepaald. Figuur 6.6 is vergelijkbaar met figuur 3 uit het bovenstaande KNMI deel. Door de verandering uit te zetten in procenten ten opzichte van het gemiddelde wordt echter een duidelijker beeld verkregen.



Figuur 6.6: Afwijking in procenten van de regionale zeespiegelstijging ten opzichte van de gemiddelde zeespiegelstijging (Figuur 13.21a uit het IPCC WGI Rapport)

In het rapport Monitoring Zeespiegelstijging (eind dit jaar) en de rapportage van het KNMI met de nieuwe scenario's (voorjaar 2014) wordt hier nog verder op ingegaan.

7 Conclusies ten behoeve van keringbeheer

In de voorgaande hoofdstukken is een overzicht gegeven van nieuwe inzichten ten aanzien van de te verwachten zeespiegelstijging, zoals die verkregen is vanuit het nieuwe IPCC rapport en de overige verschenen literatuur. Hieronder staan de conclusies vermeld die van belang zijn voor het beheer van de stormvloedkeringen:

- Voor de Nederlandse situatie wordt tot nu toe uitgegaan van een gemiddeld scenario van relatieve zeespiegelstijging van 60 cm (over de periode 1990 – 2100). Dit is het gemiddelde van de 4 KNMI scenario's. Twee daarvan geven een stijging van 85 cm en twee geven een stijging van 35 cm.
- De nieuwe IPCC scenario's voor zeespiegelstijging zijn iets hoger dan de vorige, omdat nu meer rekening gehouden is met het sterkere afsmelten van de ijskappen (Groenland en Antarctica). In de nu geldende KNMI scenario's is dit sterkere afsmelten al meegenomen. Het KNMI verwacht dat de nieuwe scenario's, die begin volgend jaar zullen verschijnen (voorjaar 2014), niet of zeer weinig zullen afwijken op het punt van zeespiegelstijging.

- Voor het beheer en onderhoud van de stormvloedkeringen heeft dit dus geen consequenties.
- Voor zowel de Oosterscheldekering als de Maeslantkering is uitgegaan van een totale zeespiegelstijging van 50 cm. (Deze waarden zijn gecheckt bij Hans Janssen, het zou goed zijn om hier nog eens de ontwerpdocumenten bij te halen). Dit is minder dan de scenario waarde voor 2100 (60 cm). Gegeven het huidige scenario zijn de keringen veilig ten aanzien van zeespiegelstijging tot ongeveer het jaar 2085. Uiteraard is zeespiegelstijging slechts één van de vele onderdelen die de veiligheid van de keringen bepalen.

8 Literatuur

Baart, F., Koningsveld, M. en Stive, M.J.F., 2012a, Trends in Sea-Level Trend Analysis, Journal of Coastal Research, Vol. 3, Issue 1, January 2012

Baart, F.; van Gelder, P.H.A.J.M.; de Ronde, J.; van Koningsveld, M., and Wouters, B., 2012b, The Effect of the 18.6-Year Lunar Nodal Cycle on Regional Sea-Level Rise Estimates, Journal of Coastal Research, 2012.

Chambers, D. P., M. A. Merrifield, and R. S. Nerem, 2012: Is there a 60-year oscillation in global mean sea level?, Geophysical Research Letters, 39.

Dean, R.G. and Houston J.R., Recent sea level trends and accelerations: Comparison of tide gauge and satellite results, Coastal Engineering 75 (2013), 4-9

Deltares (2010), Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte; rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament, 1201993-002, 15 september 2010, D. Dillingh, F. Baart, J.G. de Ronde.

Feng, G., Jin, S., Zhang, T., 2012, Coastal sea level changes in Europe from GPS, tide gauge, satellite altimetry and GRACE, 1993–2011, Advances in Space research, Elsevier. Available online at www.sciencedirect.com

Gehrels, W.R., Philip L. Woodworth, P.L., 2013, When did modern rates of sea-level rise start?, Global and Planetary Change 100 (2013) 263–277, Elsevier

IPCC, Working Group I contribution to the fifth assessment report Climate Change 2013: The Physical science basis, Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment.

IPCC, Summary for Policymakers, Twelfth session of Working Group, 27 september 2013

Wahl, T., Haigh, I.D., Woodworth P.L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., Nicholls, R.J., Weisse R., Wöppelmann, G., 2013, Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present, Earth Science Reviews 124 (2013) 51-67