

## Memo

**Aan**  
Jean-Marie Stam, RWS

<b>Datum</b> 1 september 2017	<b>Kenmerk</b> 11200541-001-ZKS-0005	<b>Aantal pagina's</b> 7
<b>Van</b> Matthijs den Toom	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88335 7937	<b>E-mail</b> matthijs.dentoom@deltares.nl

**Onderwerp**  
Reproduceerbaarheid zeespiegelprojecties

---

## 1 Inleiding

Dit onderzoek vindt plaats in aansluiting op de onderzoeksagenda zeespiegelmonitor (Baart 2014). Veel beslissingen worden genomen op basis van de zeespiegelmetingen, berekeningen en scenario's.

Het is belangrijk dat we ze kunnen vertrouwen. Om gegevens te vertrouwen moeten ze betrouwbaar en valide zijn. Betrouwbaarheid bestaat uit reproduceerbaarheid (kan het herhaald worden), gevoeligheid (is de uitkomst afhankelijk van perturbaties of keuzes) en stabiliteit (worden afrondingen uitvergroot). In dit deelonderzoek concentreren we ons op de reproduceerbaarheid. Deze memo sluit aan bij de twee memo's over de reproduceerbaarheid van metingen en de bepaling van de huidige zeespiegel. In deze memo worden de zeespiegelprojecties zoals deze op dit moment in gebruik zijn (KNMI 2014) behandeld.

De "Zeespiegelmonitor" is de periodieke rapportage over de stand van de zeespiegel. Deze monitor bestaat uit rapportages en de beschikbaarheid van de methode in de vorm van interactieve rekendocumenten. Naast het periodiek rapporteren wordt ook gewerkt aan het uitbreiden van de kennis en kwaliteit van de zeespiegelmonitor. Voor de periode 2016 tot en met 2018 is een onderzoeksagenda opgesteld, waarin de onderwerpen begrip (Kunnen we de variaties in de zeespiegel goed verklaren?), integratie (sluiten de toepassingen op elkaar aan?) en vertrouwen (zijn metingen en voorspellingen valide en betrouwbaar?). Dit onderzoek maakt onderdeel uit van het onderdeel vertrouwen.

Het gebrek aan reproduceerbaarheid van gegevens is onder onderzoekers een hot item. De reproduceerbarheids crisis, zoals deze methodologische herbezinning inmiddels te boek staat (Schooler 2014), begon in de sociale psychologie door de onthullingen van de fraude van Stapel en is inmiddels overgewaaid naar andere vakgebieden zoals engineering en aardwetenschappen. De definitie van reproduceerbaarheid wordt niet altijd consistent gebruikt. Hier gebruiken we de definitie dat reproduceerbaarheid slaat op het kunnen herhalen van iemands anders werk op basis van dezelfde data. Nog een stap verder ligt replicerbaarheid waarbij twee onderzoekers onafhankelijk data verzamelen en methoden toepassen om tot dezelfde conclusie komen (Peng 2011). Uit een onderzoek onder 1500 wetenschappers, gepubliceerd in Nature, blijkt dat 90% van mening is dat er een reproduceerbarheids crisis is (Baker 2016). Wetenschappers gaven

aan dat aspecten zoals de werkdruk, gebrek aan openheid van code en methode, ontbreken van ruwe data, ontbreken van reviews en fraude tot slechte reproduceerbaarheid geleid hebben.

Bij de uitwerking van de invloed van klimaatverandering op Nederland beperkt het KNMI zich tot een viertal scenario's. Deze worden gevormd door de combinatie van twee mogelijke veranderingen in twee grootheden. Enerzijds worden projecties van de wereldgemiddelde temperatuur beschouwd, een getypeerd als gematigd (G), de ander als warm (W). Daarnaast worden mogelijke veranderingen in luchtcirculatie in ogenschouw genomen, een getypeerd als laag (L), de ander als hoog (H). Voor de zichtjaren 2050 en 2085 wordt voor elk van de scenario's een groot aantal kentallen gepresenteerd. De vigerende scenario's zijn gebaseerd op het vijfde IPCC rapport en kwamen in 2014 uit (KNMI, 2014). In 2006 werd de vorige versie van de scenario's gepubliceerd (KNMI, 2006). Bij het opstellen van de projecties voor zeespiegelstijging is geen onderscheid gemaakt naar mogelijke veranderingen in luchtcirculatie, omdat deze nauwelijks invloed hebben. Ten opzichte van 1995 wordt voor 2050 een zeespiegelstijging verwacht van 15 tot 30 cm (95% betrouwbaarheidsinterval) volgens het G-scenario, en van 20 tot 40 cm volgens het W-scenario. Voor 2085 is de verwachting 25 tot 60 cm volgens het G-scenario en 45 tot 80 cm volgens het W-scenario.

## 2 Vraagstelling

De vraag waarop in dit memo antwoord gegeven wordt, luidt: Hoe goed is de reproduceerbaarheid van de door het KNMI bepaalde zeespiegelprojecties voor de Noordzee voor de jaren 2050 en 2085?

## 3 Onderzoeksmethode

Voor dit onderzoek zijn interviews uitgevoerd met de personen bij het KNMI die betrokken zijn bij het opstellen van de zeespiegelprojecties, te weten:

- Dewi Le Bars, hoofdverantwoordelijk voor het opstellen van de zeespiegelprojecties (interview 15 juni 2017).
- Sybren Drijfhout, verbonden aan de universiteit van Southampton en aan het KNMI, als bijzonder hoogleraar Dynamica van het Klimaat op de Buys Ballotleerstoel, betreffend de veranderingen van de zeespiegel en de gevolgen daarvan voor de waterhuishouding (interview 30 juni 2017)

Daarnaast is gesproken met Alessandro Spinuso, specialist in reproduceerbaarheid van rekenprocessen en data-traceerbaarheid (interview 15 juni 2017)

Reproduceerbaarheid wordt onderzocht door de volgende aspecten te onderzoeken:

- Eenduidigheid. Is de methode goed beschreven. In onderzoek worden er keuzes gemaakt om de data te behandelen. Zijn al deze keuzes beschreven en gemotiveerd. Dit is nodig voor een andere onderzoeker om de methode zelfstandig na te kunnen doen.
- Traceerbaarheid. Is het na te gaan welke stappen door wie, wanneer, waarom zijn gevolgd. Wie heeft wat en wanneer gedaan? Welke data is gebruikt? Wanneer is de data gedownload? Welke versie van de software is gebruikt.

- Openheid. Zijn de onderdelen publiek beschikbaar en kunnen ze gecontroleerd worden?
- Overdraagbaarheid. Kan de methode door een andere onderzoeker worden uitgevoerd. Zijn er minstens twee personen die het onderzoek kunnen uitvoeren?

## 4 Resultaten

Bij het opstellen van de zeespiegelprojecties wordt uitgegaan van op fysica gebaseerde (numerieke) modellen. Daarbij worden de volgende processen meegenomen:

- toename in oceaanvolume gerelateerd aan temperatuur en zoutgehalte;
- veranderingen van de zeespiegel die samenhangen met aanpassingen in de (grootschalige) circulatie;
- toename van de oceaanmassa door smelt van gletsjers en kleine ijskappen;
- veranderingen in de massabalans van de grote ijskappen van Groenland en Antarctica;
- veranderingen in de watervoorraad op land (meren, rivieren, wetlands, sneeuw, grondwater);
- lokale veranderingen in de luchtdruk aan het oppervlak; en
- elastische deformatie en aanpassingen van het zwaartekrachtveld ten gevolge van het smelten van landijs.

De overige processen die leiden tot veranderingen in het aardoppervlak worden expliciet uitgesloten, zoals inklinking en postglaciale opheffing. De projecties geven dus een beeld van de absolute verandering van zeeniveau langs de Nederlandse kust.

Voor het bepalen van de zeespiegelstijging draait het KNMI zelf geen grootschalige numerieke modellen. De projecties komen tot stand door het combineren van reeds beschikbare data van klimaatmodellen en gegevens uit de relevante literatuur, zie onderstaande tabel. Voor een belangrijk deel wordt uitgegaan van het archief dat is opgebouwd in het *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5; Taylor et al., 2012), dat ook de basis vormt voor het vijfde IPCC rapport. Het tweede belangrijke ingrediënt betreft de zogenoemde *fingerprints* (Katsman et al., 2011; Slangen et al., 2014) die aangeven hoe het smelten van de verschillende ijskappen doorwerkt in de lokale zeespiegel.

Voor wat betreft de bijdrage van de Groenlandse en Antarctische ijskappen wordt onderscheid gemaakt tussen veranderingen in de oppervlakte-massabalans van de ijskap (smelt en neerslag) en de gevolgen van dynamische veranderingen in het omringende zee-ijs door afkalving en smelt van onderaf. Deze dynamische verandering zijn door het IPCC niet meegenomen in de projecties voor zeespiegelstijging. In de resultaten van het KNMI is deze bijdrage wel verdisconteerd, gebaseerd op *expert judgement* van de beschikbare literatuur.

*Tabel: overzicht databronnen voor de zeespiegelprojecties.*

Databron	Openbaar	Online beschikbaar	Versiebeheer
CMIP5	ja	ja, downloadbaar ( <a href="http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_getting_started.html">http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_getting_started.html</a> )	Versie 5, Taylor et al., 2012
Mondiaal gletsjer- en ijskapmodel	ja	na te gaan	Giesen and Oerlemans, 2013
	ja	na te gaan	Marzeion et al., 2012
	ja	na te gaan	Radic et al., 2014
	ja	na te gaan	Slangen and Van de Wal, 2011
Fingerprints	ja	na te gaan	Katsman et al., 2011
	ja	Met bronvermelding vrij beschikbaar op <a href="http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/coastal-sea-level-changes.html">http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/coastal-sea-level-changes.html</a>	Slangen et al., 2014
Watervoorraad op land	ja	na te gaan	Wada et al., 2012

### Beschreven

De methode is goed gedocumenteerd in technische rapporten van het KNMI en in de internationale literatuur. Voor de KNMI'06 scenario's (KNMI, 2006) betreft dat de publicatie van Katsman et al. (2008). Voor de vigerende KNMI'14 scenario's (KNMI, 2014) gaat het om het werk van De Vries et al. (2014), dat als open access publicatie beschikbaar is. De informatie is bovendien grotendeels direct terug te vinden of af te leiden uit de appendices bij hoofdstuk 13 van IPCC AR-5 (Church et al., 2013). De beschrijving is voldoende gedetailleerd om de methode te herhalen.

### Traceerbaar

De zeespiegelprojecties komen tot stand door het uitvoeren van de beschreven methode op de aangegeven brondata. Er is geen sprake van het tussenstappen waarbij informatie verloren kan gaan. De zeespiegelstijging is de som van de bijdrage uit verschillende bronnen. Het technische rapport (KNMI, 2014) geeft een overzicht van de bijdrages per bron.

### Overdraagbaar

De overdraagbaarheid van de methode is goed. In de afgelopen jaren is ze achtereenvolgens door Caroline Katsman (nu verbonden aan de TU Delft), Hylke de Vries en Dewi le Bars (beiden nog KNMI) toegepast. Hoewel de uitvoering bij één persoon is belegd, zijn er meerdere personen bekend met de methode. De publicaties over zeespiegelstijging zijn ook steeds met een groep tot stand gekomen.

## Herhaalbaar

De methodiek is goed herhaalbaar. Hoewel er op details verschillende keuzes zijn gemaakt, is de methodiek op abstract niveau de afgelopen jaren hetzelfde gebleven en inmiddels door verschillende personen toegepast. Dewi Le Bars gaf aan dat hij het resultaat van Hylke de Vries uit 2014 succesvol heeft gereproduceerd. Verder blijken gevoeligheidsexperimenten stabiele resultaten te geven. Ten slotte wordt in omringende landen vergelijkbaar onderzoek gedaan en zijn de resultaten daarvan vergelijkbaar (referenties?)

## Herleidbaar (software en data)

De resultaten van de De Vries (2014) zijn gebaseerd op een implementatie van de methode in *R*. Deze code is niet in versiebeheer en niet publiek beschikbaar. Dewi Le Bars heeft de methode geheel opnieuw gecodeerd in de *NCAR Command Language* (NCL). De grootte bedraagt ruwweg 1000 regels code. Ook deze code is niet in versiebeheer en niet publiek (maar wel op aanvraag) beschikbaar. In het interview gaf Dewi Le Bars aan dat de herleidbaarheid van de software verbeterd kan worden.

De herkomst van de brondata is gedocumenteerd en alle data is openbaar beschikbaar. In geval van het CMIP5 archief is zijn de gegevens (na registratie) te downloaden, al is een praktische belemmering daarbij de grootte van het archief (3.3 PB). Van de overige bronnen zijn de gegevens op te vragen bij de betreffende auteurs of bij het KNMI. Deze bronnen zijn ook (deels) online ontsloten, maar referenties naar webadressen ontbreken in de beschrijving van de zeespiegelprojecties.

## 5 Adviezen

De reproduceerbaarheid van de projecties is goed op orde. Veel van de verbeteringen de in reproduceerbaarheid zijn in de laatste jaren doorgevoerd. De datasets worden kosteloos gedeeld en zijn goed gestandaardiseerd en beschreven. Het open delen van de data is breed beleid, maar wordt nog niet overal nageleefd. De KNMI ligt hier in voorop doordat ze datasets standaard volledig openbaar maken en niet deels of pas als er om gevraagd wordt. We raden aan om de proactieve werkwijze van de KNMI verder navolging te geven in andere onderdelen van de overheid, waaronder binnen Rijkswaterstaat.

Wat wel een punt van aandacht is, zo blijkt uit de interviews, is de beschikbaarheid en traceerbaarheid van de software. We adviseren om de werkwijze omtrent de in gebruik zijnde software en scripts te verbeteren. Dit kan door ook de software openbaar te maken in een versiebeheer systeem, bijvoorbeeld via <https://github.com/KNMI>, waar ook al andere software wordt gedeeld. Verder is het raadzaam om voor kritische software, zoals deze gebruikt wordt voor de projecties, ook gangbare kwaliteitscontroles te gebruiken (unit, integratie tests, validaties, code reviews, etc...).

Een deel van de datasets zijn omvangrijk (bijvoorbeeld de totale omvang van de CMIP5 datasets is 3.3 PB). Hierdoor is de reproduceerbaarheid niet een methodologisch maar een praktisch probleem. Sommige instituten, zoals de NOAA (NOAA 2017) volgen de aanpak dat ze de data niet alleen via hun eigen website beschikbaar stellen, maar ook via publieke cloud providers. Zo kan iedereen een computer huren naast de data. Dat voorkomt dat iedereen de 3.3 PB dubbel moet opslaan.

Ten slotte adviseren we om de data die bij publicaties wordt gegenereerd en de software die bij de publicatie wordt ontwikkeld ook te publiceren in een persistente vorm, door het toekennen van een DOI via de daarvoor beschikbare kanalen zoals bijvoorbeeld een dienst als Zenodo of via de 4TU.

## 6 Referenties

- 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 and A.S. Unnikrishnan (2013): Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- De Vries, H., C. Katsman, and S. Drijfhout (2014): Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways. *Environmental Research Letters* 9 (11).
- Giesen, R.H. and J. Oerlemans (2013): Climate-model induced differences in the 21st century global and regional glacier contributions to sea-level rise. *Climate Dynamics* 41 (11-12). doi:10.1007/s00382-013-1743-7
- Katsman, C. A., W. Hazeleger, S.S. Drijfhout, G.J. van Oldenborgh and G. Burgers (2008): Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. *Climatic change* 91(3).
- Katsman, C.A., A. Sterl, J.J. Beersma, et al. *Climatic Change* (2011): Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta: the Netherlands as an example. *Climatic. Change* 109 (3-4).
- KNMI (2006): *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*; by Bart van den Hurk, Albert Klein Tank, Geert Lenderink, Aad van Ulden, Geert Jan van Oldenborgh, Caroline Katsman, Henk van den Brink, Franziska Keller, Janette Bessembinder, Gerrit Burgers, Gerbrand Komen, Wilco Hazeleger and Sybren Drijfhout. Scientific Report WR 2006-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands.
- KNMI (2014): *KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective*; by Bart van den Hurk, Peter Siegmund, Albert Klein Tank (Eds), Jisk Attema, Alexander Bakker, Jules Beersma, Janette Bessembinder, Reinout Boers, Theo Brandsma, Henk van den Brink, Sybren Drijfhout, Henk Eskes, Rein Haarsma, Wilco Hazeleger, Rudmer Jilderda, Caroline Katsman, Geert Lenderink, Jessica Loriaux, Erik van Meijgaard, Twan van Noije, Geert Jan van Oldenborgh, Frank Selten, Pier Siebesma, Andreas Sterl, Hylke de Vries, Michiel van Weele, Renske de Winter and Gerd-Jan van Zadelhoff. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. [www.climate-scenarios.nl](http://www.climate-scenarios.nl).
- Le Bars, D., S. Drijfhout, and H. de Vries (2017): A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. *Environmental Research Letters* 12 (4).



**Datum**  
1 september 2017

**Ons kenmerk**  
11200541-001-ZKS-0005

**Pagina**  
7/7

Marzeion, B., A.H. Jarosch, and M. Hofer (2012): Past and future sealevel changes from the surface mass balance of glaciers. *Cryosphere* 6 1295–322

NOAA, Big Data Project, <http://www.noaa.gov/big-data-project> (opgevraagd 2017-09-01)

Peng, R. D. (2011). Reproducible research in computational science. *Science*, 334(6060):1226–1227.

Radic V., A. Bliss, A.C. Beedlow, R. Hock, E. Miles, and J.G. Cogley (2014): Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Climate Dynamics* 42 37–58

Slangen, A.B.A., and R.S.W. van de Wal (2011): An assessment of uncertainties in using volume-area modelling for computing the twenty-first century glacier contribution to sea-level change. *Cryosphere* 5 673–86

Slangen, A.B.A., M. Carson, C.A. Katsman, R.S.W. van de Wal, A. Köhl, L.L.A. Vermeersen, and D. Stammer (2014): Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change* 124.

Taylor, K.E., R.J. Stouffer, and G.A. Meehl (2012): An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 485–98.

Wada Y., L.P.H. van Beek, F.C. Sperna Weiland, B.F. Chao, Y-H. Wu, and M.F.P. Bierkens (2012) Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 39 1–6