

Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust: een beschouwing op basis van 128 jaar meten bij getijstations

R.P. NICOLAI, F. BAART EN G. RONGEN

De actuele stand en stijging van de zeespiegel langs de kust zijn belangrijke parameters voor het Nederlandse kustbeleid. De kust is fundamenteel voor onze veiligheid, drinkwatervoorziening, ecologie en recreatie. Het is daarom zaak om de zeespiegelstijging nauwlettend te monitoren en inzicht te verkrijgen in het gedrag over de tijd. Een combinatie van data science, modelberekeningen en archiefonderzoek leidde tot verschillende nieuwe inzichten. Uit de analyses van de metingen bij getijstations in de periode 1890-2017 blijkt dat de zeespiegel langs de Nederlandse kust in de laatste decennia minder snel stijgt dan gemiddeld wereldwijd. Bovendien is de stijging niet significant versneld. De relatieve zeespiegel stijgt met 18,6 cm/eeuw, waarvan 4,5 cm/eeuw komt door bodemdaling. De wereldwijde zeespiegelstijging over de periode 1993-2018 is 32 cm/eeuw. De belangrijkste verklaring voor dit verschil is de gunstige geografische ligging van Nederland ten opzichte van het smeltend ijs. Hierdoor komt 9 cm/eeuw van de 32 cm/eeuw niet bij Nederland, maar meer bij de evenaar terecht.

Artikel

Inleiding

De zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is van belang voor het Nederlandse kustbeleid. Het handhaven van de kustlijn en het kustfundament zijn twee belangrijke pijlers van het landelijke kustbeleid. Het kustfundament is het deel van de kust dat van belang is als drager van functies in het kustgebied. Handhaving vindt plaats door morfologische interventies in de vorm van zandsuppleties. Het benodigde volume zand wordt bepaald door het oppervlak van een deel van het kustfundament te vermenigvuldigen met de zeespiegelstijging. Het streven is om het gehele kustfundament inclusief de landzijde mee te laten groeien met de zeespiegel. Voor elke millimeter per jaar zeespiegelstijging wordt daarvoor momenteel 7 miljoen m³ zand gesuppleerd (Ronde, 2008). Om de jaarlijks benodigde hoeveelheid goed in te schatten, is het dus zaak om de zeespiegelstijging nauwlettend te monitoren.

Met de Zeespiegelmonitor rapporteert het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) over de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. De zeespiegelstand en de getijbeweging worden sinds 1700 gemeten. Sinds 1900 worden de gemiddelde zeespiegelstand en stijging periodiek gerapporteerd. Van 1970 tot 2010 is de jaargemiddelde zeespiegelstijging elke tien jaar gerapporteerd. Sinds 2011 gebeurt dit jaarlijks.

In de periode 2016-2018 hebben Deltares en HKV in opdracht van IenW gewerkt aan nieuwe methoden om beter inzicht te krijgen in de actuele stand en stijging van de zeespiegel langs de Nederlandse kust. De Zeespiegelmonitor 2018 (Baart e.a., 2019) geeft antwoord op onder andere de volgende onderzoeksvragen:

- Wat is een goede methode om de huidige zeespiegelstand en zeespiegelstijging te bepalen?
- Hoe snel stijgt de zeespiegel in Nederland?
- Is er sprake van een versnelling in de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust?
- Hoe kunnen we de relatieve zeespiegelstijging uitsplitsen naar bodemdaling en absolute zeespiegelstijging?
- Welk scenario van de zeespiegelstijging sluit het beste aan bij de huidige zeespiegelstijging?
- Waarom wijkt de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust af van de wereldwijd gemiddelde zeespiegelstijging?

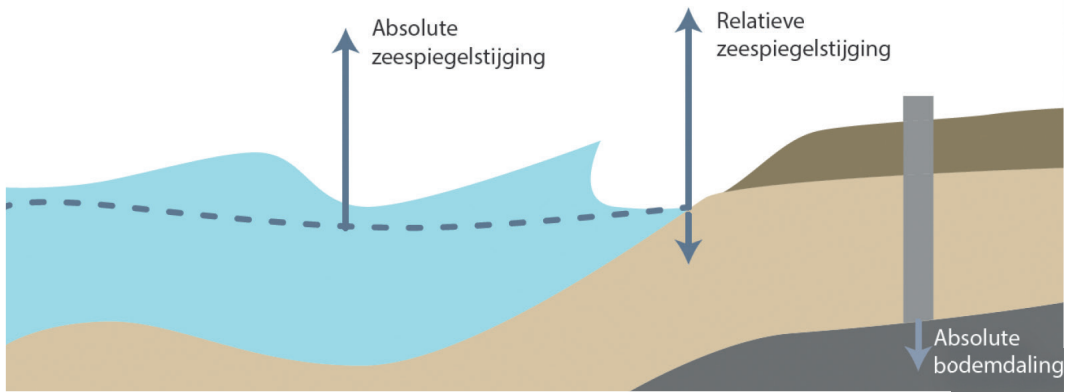
Dit artikel gaat in op de methode die is ontwikkeld om metingen van de zeespiegel te analyseren en hiermee de bovenstaande onderzoeksvragen te beantwoorden. De methode maakt gebruik van een regressiemodel voor de zeespiegel met als verklarende variabelen het (nodale) getij, een (lineaire) trend, een optionele versnelling in de trend en de wind. Het model is toegepast op metingen van de getijstations langs de kust en (ter verificatie) op satellietmetingen. Met statistische toetsen is nagegaan of de zeespiegel een versnelling of een breuk in de lineaire trend kent. De uitkomsten van het model zijn vergeleken met zowel de wereldwijd gemiddelde (mondiale) zeespiegelstijging als de nu gebruikte klimaatscenario's voor de stijging van de zeespiegel langs de Nederlandse kust op lange termijn.

Metingen

Getijstations

De zeespiegelstand langs de Nederlandse kust wordt op 51 plaatsen routinematig gemeten. Voor de Zeespiegelmonitor wordt een gemiddelde zeespiegelstand bepaald op grond van de zes hoofdstations, die verspreid langs de Nederlandse kust liggen. Deze zes stations zijn: Delfzijl (1865), Harlingen (1865), Den Helder (1865), IJmuiden (1871), Hoek van Holland (1864), Vlissingen (1862) met tussen haakjes het eerste jaargemiddelde. Door hun geografische spreiding geven de metingen een goed beeld van de gemiddelde zeespiegelstand langs de Nederlandse kust. Bij deze stations wordt al meer dan een eeuw gemeten met een hoge frequentie (minimaal uurlijks vanaf 1890). De zes hoofdstations staan gefundeerd op heipalen, maar de metingen worden wel beïnvloed door geologische bodemdaling, en door bodemdaling als gevolg van delfstofwinning. De gemeten zeespiegelstand wordt daarom relatief genoemd (zie Afbeelding 1).

Er hebben langs de Nederlandse kust diverse kleinere en grotere ingrepen plaatsgevonden die invloed hebben op de metingen. Denk hierbij aan de aanleg van de Afsluitdijk, de aanleg van de Deltawerken, sinds de jaren 1990 het dynamisch kustbeheer en de diverse lokale aanpassingen binnen havens. We maken geen onderscheid naar de invloed van deze ingrepen.



Afbeelding 1 Relatieve versus absolute zeespiegelstijging

Methoden

Diverse modellen zijn beschikbaar om een schatting van de korte-termijntrend in de zeespiegelstijging te maken. In de wetenschappelijke literatuur zijn onder andere de volgende modellen toegepast: lineair regressiemodel, Long Short-Term Memory (LSTM), een state space model (Frederikse e.a., 2016) en een Seasonal Decomposition of Time Series by Loess (STL). Een aantal instituten rapporteert een actueel zeespiegelcijfer (AVISO, CSIRO, NASA en NOAA) op basis van een regressiemodel met een lineaire trend. Ook in het Compendium voor de Leefomgeving (CBS, PBL en WUR, 2018) is de zeespiegelstijging met een lineaire trend gemodelleerd. De zeespiegel langs de Nederlandse kust stijgt immers al meer dan een eeuw vrij geleidelijk. De jaar-tot-jaarvariatie in de zeespiegel is bij benadering normaal verdeeld, waardoor een lineair regressiemodel geschikt is.

De Zeespiegelmonitor gebruikt voor de bepaling van de huidige zeespiegel het Generalized Linear Model (GLM), een gegeneraliseerde vorm van een lineair regressiemodel, omdat dit opvallend goed werkt (Watson, 2016) en omdat er geen modellen zijn die zich, op basis van criteria als robuustheid en voorspelkracht, als betere hebben bewezen. Aangezien de algemene veronderstelling is dat de zeespiegel sinds een paar decennia sneller stijgt dan daarvoor, toetsen we met dit model op de significantie van de versnelling. Daarnaast zijn ook andere modellen onderzocht, zoals een Bayesiaanse aanpak, die het mogelijk maakt om het tijdstip van een trendbreuk te detecteren.

De zeewaterstand [mm+NAP] wordt op ieder moment in de tijd beschreven door onderstaande vergelijking:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{waterstand} & \text{constante} & \text{versnelling?} & & \text{windopzet} & & \\
 \underbrace{} & \underbrace{} & \underbrace{\phantom{\beta_2 t^{*2}}} & & \underbrace{\phantom{\beta_5 u_{NZ,t} | u_{NZ,t} | \beta_6 u_{WO,t} | u_{WO,t}}} & & \\
 h_t = \phi h_{t-1} + \beta_0 + \beta_1 t^* + \beta_2 t^{*2} + \beta_3 \cos\left(\frac{2\pi t^*}{T_N}\right) + \beta_4 \sin\left(\frac{2\pi t^*}{T_N}\right) + \beta_5 u_{NZ,t} | u_{NZ,t} | \beta_6 u_{WO,t} | u_{WO,t} + \epsilon_t & (1) \\
 \underbrace{\phi h_{t-1}}_{\text{autocorrelatie}} & \underbrace{\beta_0 + \beta_1 t^*}_{\text{trend}} & & \underbrace{\beta_3 \cos\left(\frac{2\pi t^*}{T_N}\right) + \beta_4 \sin\left(\frac{2\pi t^*}{T_N}\right)}_{\text{getij}} & & & \underbrace{\epsilon_t}_{\text{residu}}
 \end{array}$$

Waarbij

- t het jaartal waarvoor de jaargemiddelde zeespiegel is bepaald, $t = 1890, \dots, 2017$,
- h_t de jaargemiddelde zeespiegel in het jaar t [mm+NAP],
- t^* tijd vanaf de epoch 1970, $t^* = t - 1970$ [jaar],
- T_N periode van de nodale getijcyclus, $T_N = 18,613$ [jaar]
- ϕ AR(1) autocorrelatieparameter [-]
- β_0 zeespiegelstand in de epoch 1970 [mm+NAP]
- β_i de coëfficiënten van de trend [mm/jaar], versnelling [mm²/jaar²], getijcomponenten [-] en windsnelheidscomponenten in het kwadraat [mm s²/m²], $i=1, \dots, 6$
- $u_{i,t}$ component van de windsnelheid in jaar t (NZ is Noord-Zuid, WO is West-Oost) [m/s]
- ϵ_t normaal verdeeld residu in jaar t , met de variantieparameter, [mm]

De versnelling is optioneel. Dat wil zeggen dat deze alleen wordt meegenomen als die statistisch significant is. Hieronder gaan we op de afzonderlijke termen van vgl. (1) in en behandelen we de modelaannames.

Constante en trend

Meestal kijken we naar zeespiegeltrends en naar veranderingen in de trends. Net zo interessant is echter hoe hoog de zeespiegel precies staat. Het nulniveau van het NAP begon ooit als het hoogwaterniveau in Amsterdam, toen het gemiddeld zeeniveau dus nog onder NAP stond (Veen, 1945). Begin jaren 1980 was de zeespiegel gelijk aan het NAP en tegenwoordig ligt NAP onder het gemiddeld zeeniveau.

Versnelling

We gaan er niet van uit dat de zeespiegel altijd de trend van de 20^{ste} eeuw blijft volgen. Daarom geven we het model de mogelijkheid om een versnelde of vertraagde zeespiegelstijging uit te rekenen met de optionele versnellingsparameter. Aansluitend op de literatuur zijn twee varianten vergeleken:

1. Een kwadratische versnelling. Dit is de gebruikelijke (Jevrejeva e.a., 2014; Church en White, 2011) en formele manier om de versnelling mee te nemen. De methode bevat naast een parameter voor de lineaire trend in de zeespiegelstijging een extra parameter voor de versnelling in de zeespiegelstijging (zie vergelijking 1). Op de significantie van deze parameter wordt statistisch getoetst.
2. Een trendbreuk in 1993. Het jaar 1993 markeert het begin van het satelliet-tijdperk ('satellite era') met de start van de TOPEX/Poseidon metingen. Dit lijkt een wat arbitraire keuze. De motivatie is als volgt: de satellietmetingen laten een grotere zeespiegelstijging zien dan de gemeten waterstanden in het getijstationtijdperk ('tide gauge era'). Hierbij wordt 1993 vaak genoemd als de start van de versnelde zeespiegelstijging (zie bijvoorbeeld Stocker e.a., 2013). Om goede vergelijkingen te maken is het daarom nodig om ook voor deze periode een trend te bepalen. In deze methode kan de trendparameter vanaf het jaar 1993 wijzigen. De significantie van de trendbreuk wordt statistisch getoetst.

De uiteindelijke modelselectie vindt plaats op twee criteria: er moet sprake zijn van een significante versnelling of vertraging, en er moet sprake zijn van een beter model. Dat laatste wordt vastgesteld met behulp van het Akaike Informatie Criterium (AIC), waarbij een afweging wordt gemaakt tussen de complexiteit van het model en de toegevoegde waarde van variabelen.

Naast de bepaling of er versnelling is die aansluit bij de literatuur is ook een andere methode beschouwd om een eventuele trendbreuk (knikpunt) te bepalen. Deze aanpak staat bekend als een Bayesiaanse MCMC-analyse. In deze aanpak kan een knikpunt op elk moment tussen 1900 en 2000 liggen. Er is een trend vóór en een trend ná het knikpunt. Uit de Bayesiaanse analyse volgt of er een significante knik is, wanneer die knik het meest waarschijnlijk plaats vond en wat de kans op detectie van een knik is als deze in werkelijkheid is opgetreden.

Getijvariatie door nodale cyclus

Het getij is de periodieke wisseling van de waterstand, en de daarmee samenhangende getijstroom, die optreedt als gevolg van de zwaartekracht van de maan en, in mindere mate, die van de zon. Het getij ontstaat doordat de afstand van zowel de maan als de zon tot de aarde over de tijd varieert. De dubbeldaagse maan- en zongetijden zijn voor de analyse van de jaargemiddelde zeespiegel niet relevant. De variatie in het getij met een periode van 18,613 jaar (gerelateerd aan de banen die maan en aarde afleggen) is dat wel. De amplitude van deze sinusbeweging is langs de Nederlandse kust ca. 10 mm. In het regressiemodel zijn de amplitude en de fase van deze langjarige getijcomponent in de vorm van een cosinus- en sinusterm (u - en v -component) toegevoegd.

Wind

Jaar-op-jaarvariaties in gemiddelde windrichting en windsnelheid langs de Nederlandse kust kunnen zorgen voor fluctuaties in de jaargemiddelde zeespiegel. De wind kan voor een grote opzet zorgen; de windopzet is evenredig aan de windsnelheid in het kwadraat. De heranalyses van de wind (een combinatie van modellen en historische gegevens) van de National Center for Environmental Prediction (NCEP; Kalnay e.a., 1996), op basis van een locatie in de Noordzee (lat: 52.38, lon: 3.75), zijn gebruikt voor de schatting van de windopzet. Om precies te zijn, zijn de maandgemiddelde Noord-Zuid- en Oost-West-component van de wind in het kwadraat gebruikt. De heranalyses van de wind zijn beschikbaar vanaf 1949.

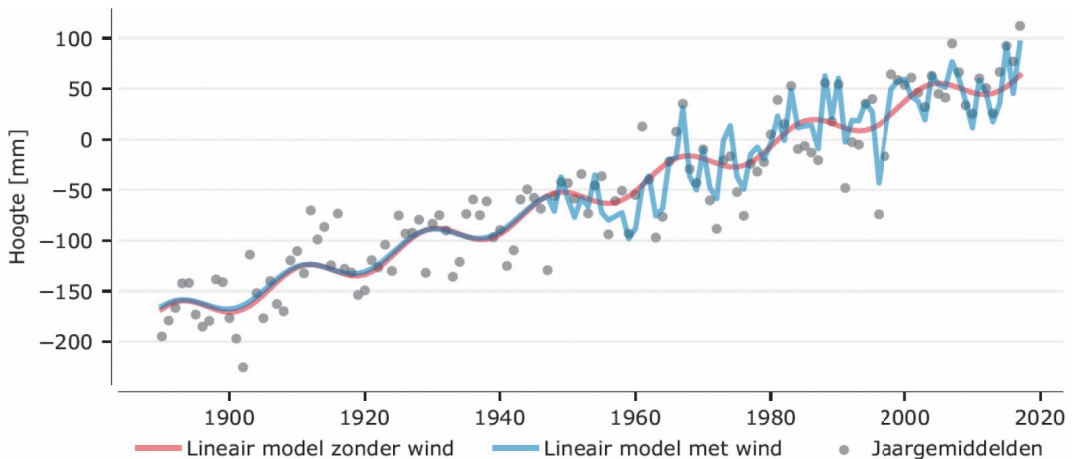
Residu en autocorrelatie

Het standaard lineaire regressiemodel heeft als aanname dat de residuen onafhankelijke identiek normaal verdeelde kansvariabelen zijn met verwachting 0 en variantie σ^2 . Met de gebruikelijke modeldiagnostiek toetsten we deze aannames. Uit een Breusch-Godfrey-test blijkt dat autocorrelatie in de jaargemiddelde zeespiegelstanden niet verwaarloosbaar is. Op basis van grafieken van de (partiële) autocorrelatiefunctie is besloten om een AR(1)-term aan het model toe te voegen. Dit is in overeenstemming met het advies van Bos e.a. (2014), zie ook Visser e.a. (2015) voor een nadere discussie. Daarnaast is de variantie van

de residuen afhankelijk van de verklarende variabelen. Om een trendbreuk te herkennen is het belangrijk dat de trendparameter nauwkeurig wordt geschat. De standaardfouten van de parameters zijn op robuuste wijze geschat via de zogenaamde Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent (HAC) estimator (Zeileis, 2004). Zowel het toevoegen van de autocorrelatieterm als de correctie voor heteroskedasticiteit heeft geen effect op de schattingen van de huidige zeespiegelstand, alleen op de standaardfouten ervan.

Resultaten

Afbeelding 2 toont de zeespiegelstand als functie van de tijd. De zeespiegelstand is voor het jaar 2017 vastgesteld op 6 cm boven NAP. Voor het jaar 2017 bedraagt de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust 1,86 mm/jaar ofwel 18,6 cm/eeuw. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de trend is gegeven door $1,86 \pm 0,12$ mm/jaar ofwel $18,6 \pm 1,2$ cm/eeuw. De trend en het betrouwbaarheidsinterval zijn berekend over de periode 1890 tot en met 2017.



Afbeelding 2 Huidige zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust op basis van het gemiddelde van de zes hoofdstations. De rode lijn laat de curve zien met gemiddelde wind. De blauwe lijn laat de curve zien gecorrigeerd voor de windgegevens uit de heranalyse.

Tabel 1 bevat de geschatte parameterwaarden (coëfficiënten) van de verklarende variabelen in vgl. (1). De nulhypothese dat de coëfficiënten van de termen trend, getij en wind gelijk zijn aan nul wordt bij een significantieniveau van 5% verworpen. De jaar-tot-jaarvariatie in de stand van de zeespiegel is voornamelijk toe te schrijven aan de opstuwende kracht van stormen. In jaren met veel kustgerichte wind, vanuit het westen, staat de zeespiegel 10 ± 2 mm hoger per m^2/s^2 extra jaargemiddelde wind in het kwadraat. Ter illustratie, als tijdens een storm het water drie dagen lang 1,22 m hoger staat dan gemiddeld, dan stijgt de gemiddelde zeespiegel voor dat jaar met 10 mm. Het nodaal getij heeft een amplitude van $11,0 \pm 5,8$ mm.

Tabel 1 Overzicht van de parameters van de bepaling van de huidige zeespiegel en de trend in de stijging hiervan. De zeespiegel is berekend ten opzichte van het (post-2005) NAP. De tweezijdige t-toets op significantie van de parameter heeft als nulhypothese "parameterwaarde = 0" en als alternatieve hypothese "parameterwaarde \neq 0".

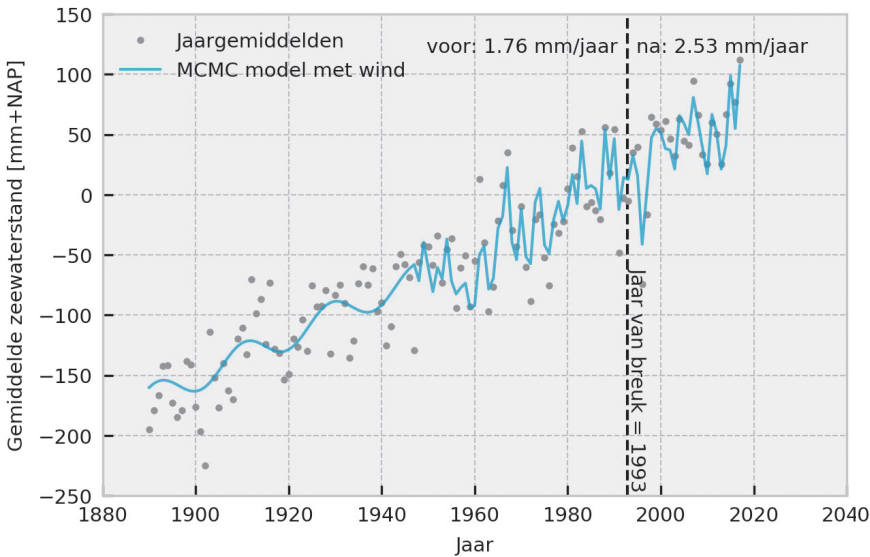
Term	Parameterwaarde (standaardfout)	p-waarde van t-toets op significantie
Constance	-62,4 (4,78) [mm+NAP]	0,00
Trend	1,86 (0,06) [mm / jaar]	0,00
Nodale cyclus u-component	3,47 (2,86) [mm / jaar]	0,23
Nodale cyclus v-component	-10,5 (2,97) [mm / jaar]	0,00
Wind kwadraat: WO-component	10,9 (1,08) [mm / (m ² /s ²)]	0,00
Wind kwadraat: NZ-component	1,58 (2,66) [mm / (m ² /s ²)]	0,55

Versnelling?

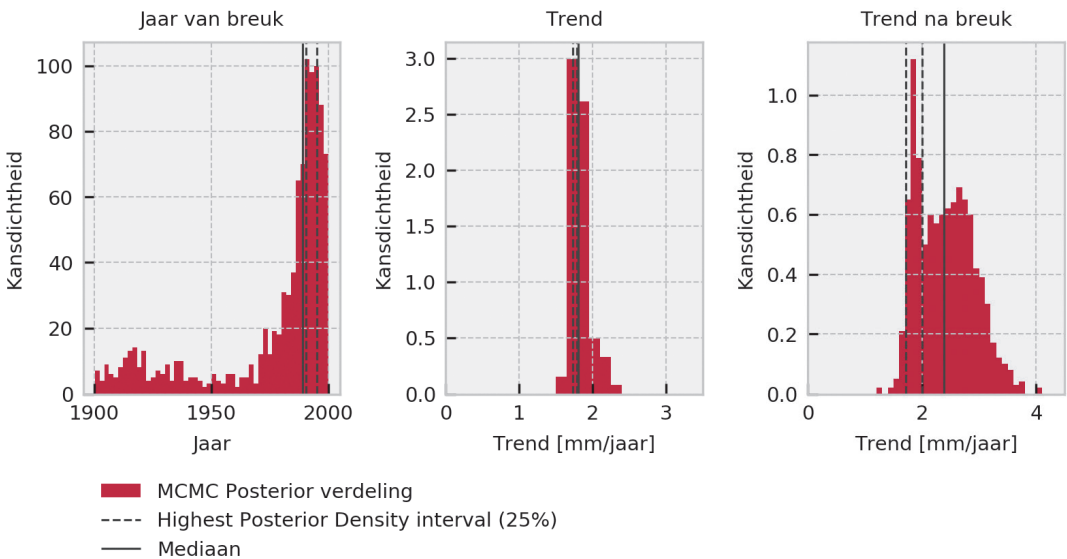
Of er een versnelling is stellen we vast door de modellen met versnelling (met acceleratieterm en met trendbreuk) te vergelijken met het model zonder versnelling. Het model met een acceleratieterm laat een vertraagde zeespiegel zien; $-0,0001 \pm 0,0040$ mm/jaar². Het model met een trendbreuk in 1993 laat een hogere trend in de zeespiegelstijging zien; 2,4 mm/jaar ná 1993 tegenover 1,8 mm/jaar vóór 1993, ofwel een extra $0,6 \pm 0,8$ mm/jaar. Geen van beide versnellingsmodellen blijken echter een significante verbetering te zijn ten opzichte van het model zonder versnelling. Dat wil zeggen dat we de nulhypothese dat er geen versnelling is niet kunnen verwerpen op basis van de waargenomen acceleratie of trendbreuk. Beide modellen worden op basis van AIC wel als een beter model geselecteerd dan het model zonder versnelling. Modelselectie op basis van AIC alleen leidt hier tot het toevoegen van te veel verklarende variabelen ('overfitting'). Op basis van de combinatie van de twee onder het kopje 'Versnelling' geformuleerde criteria (significante versnelling en AIC) wordt het model zonder versnelling gekozen.

Om te kijken of we een versnelling zullen vinden als deze optreedt, gebruiken we de Bayesiaanse MCMC-analyse om een posterior kansverdeling van een knikpunt en de trend vóór en ná dit knikpunt te maken. Dit gaat er vanuit dat we niet weten wanneer een versnelling is opgetreden en dat deze instantaan optreedt.

In Afbeelding 3 zien we dat een knikpunt in 1993 het meest waarschijnlijk is, met een trend die na de knik 0,8 mm/jaar hoger is dan ervoor. Dit is een iets hogere extra stijging dan het gebroken trend-model vindt met de trendbreuk vastgesteld op 1993. Het knikpunt en de extra trend zijn vooral toe te schrijven aan de lage zeespiegelstand in 1996. Afbeelding 4 geeft de posterior kansverdeling van het knikpunt en de trends vóór en ná de knik. Hieruit volgt dat het meest waarschijnlijke knikpunt in 1993 lag. De kansverdelingen van de trend vóór en ná 1993 overlappen. De kans dat de trend vóór en ná gelijk zijn is nog aanzienlijk. Als de trend ná 1993 nóg 0,5 mm/jaar hoger was, dan zou deze nu significant zijn. Datzelfde geldt als deze trendverandering nog 20 jaar doorzet en een verschil maakt van 2,5 cm. Hoe meer metingen we verzamelen, hoe smaller het interval wordt. Ook het beter verklaren van de residuen, door de windeffecten met GTSM te schatten, zal de kans op versnellingsdetectie doen toenemen.



Afbeelding 3 Huidige zeespiegel vóór en ná het meest waarschijnlijke knippunt. De blauwe curve toont het gefitte model met knippunt in 1993.



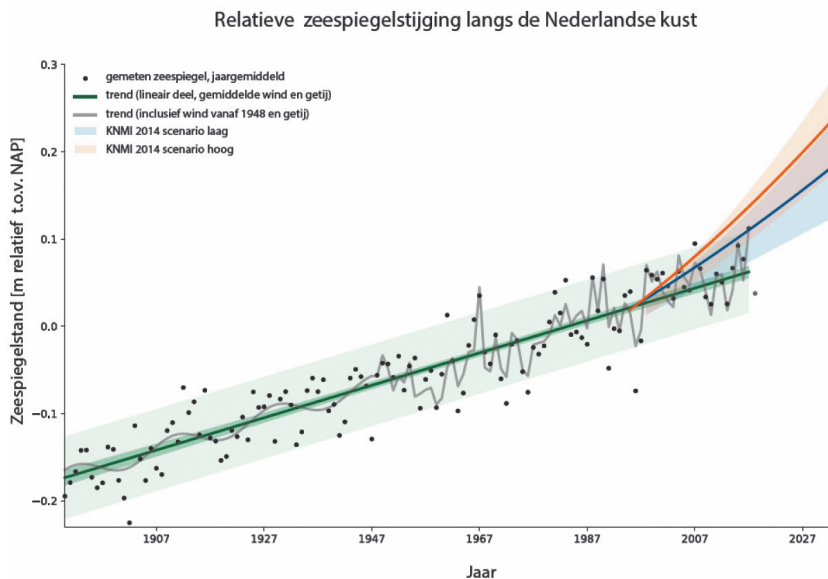
Afbeelding 4 Posterior kansdichtheidsfuncties van het MCMC model. Links de kansverdeling van het jaar van het knippunt, midden de trend vóór en rechts, de trend ná.

Een poweranalyse is een frequentistische manier om de kans dat je een effect vindt uit te rekenen (Cohen, 1988). Hier betreft het effect de versnelling in de zeespiegelstijging. De power is de kans op detectie hiervan. Hoe groter de versnelling, hoe groter de kans dat je de versnelling detecteert. Drie versnellingen zijn vergeleken: de geobserveerde versnelling, een extra 0,2 mm/jaar en een extra 0,5 mm/jaar zeespiegelstijging sinds 1993. Omdat het lineaire model al veel variantie verklaart, heeft een klein effect al een grote kans om nu gedetecteerd te worden. Een extra 0,2 mm/jaar zeespiegelstijging vanaf 1993 (bovenop

de huidige) zou ervoor zorgen dat de kans op detectie van een versnelling nu 50% was. Als de zeespiegel 0,5 mm/jaar meer zou zijn gestegen sinds 1993, dan was de kans bijna 80% dat we nu een significante versnelling hadden gedetecteerd.

Huidige zeespiegelstijging versus scenario's

Hoe verhoudt de huidige zeespiegelstijging zich tot de toekomstige? Afbeelding 5 laat zien dat de huidige zeespiegel nu aan de onderkant ligt van het laagste KNMI'14 scenario (zoals geformuleerd in Hurk e.a., 2014). De punten in de grafiek tonen de gemeten jaarlijkse gemiddelde zeespiegelstanden langs de Nederlandse kust over de zes Nederlandse hoofdstations. De dunne grijze lijn toont het statistisch model dat rekening houdt met langjarige trends, getij en stormen in de Noordzee. De rechte groene lijn laat de lineaire trend van de zeespiegelstand tussen 1900 en nu zien. De doorzichtige lichtgroene band geeft de 95% bandbreedte van de metingen. De curves boven de lijn laten de zeespiegelstijging volgens de twee KNMI-scenario's uit 2014 zien. Deze scenario's geven de mogelijke zeespiegelstijging aan bij 2°C (blauw) en 4°C temperatuurstijging (rood) in 2100 met een onzekerheidsmarge. Het startpunt van deze scenario's is het midden van het tijdvak 1985-2005 dat voor deze scenario's als referentie werd gebruikt. De scenario's laten alleen de zeespiegelstijging zien die is toe te schrijven aan de verandering van het watervolume en watertemperatuur van de wereldwijde oceanen. Regionale fluctuaties, veroorzaakt door stormcondities of veranderingen in het getij, zijn geen onderdeel van de KNMI'14 scenario's.



Afbeelding 5 Vergelijking tussen metingen en zeespiegelscenario's van (Hurk e.a., 2014), inclusief bodemdaling. De bandbreedte van de KNMI scenario's is gebaseerd op een polynomenfit door de 90% percentielen van de ensemble members. De lichtgroene band is het 95% predictie-interval van de zeespiegel. De donkergroene band is het 95% betrouwbaarheidsinterval van de trend in de zeespiegelstijging.

De zeespiegel aan de Nederlandse kust is dus minder gestegen dan waar in de twee KNMI scenario's van uit werd gegaan. Dit betekent niet dat de scenario's niet kloppen, het waren immers studies die mogelijke toekomstige condities berekenden ("het zou kunnen dat, met de kennis van toen"). Gegeven dat de poolkappen massa verliezen en de aarde opwarmt, verwachten we nog steeds een versnelde zeespiegelstijging. De conclusie is wel dat de stijging langs de Nederlandse kust nog niet zo hoog is als waar in de scenario's vanuit werd gegaan.

Ten opzichte van de mondiale stijging

Over de 20^e eeuw beschouwd ligt de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust aan de onderkant van de mondiale schattingen. De zeespiegelstijging over de periode 1993-2017 is ook lager dan de mondiale stijging. Op basis van de knikaanpak komen we op een absolute zeespiegelstijging van $2,4 - 0,45 = 1,95$ mm/jaar over de periode 1993-2017. De $0,45$ mm/jaar is de bodemdaling (tektoniek en isostasie, zie Hijma en Kooi, 2018), waar we voor moeten corrigeren. De mondiale zeespiegelstijging is circa 3 mm/jaar. Deze is afgeleid uit satellietmetingen (zie bijvoorbeeld Watson e.a., 2015) en reconstructies van getijstations (Jevrejeva e.a., 2014).

Het verschil met de mondiale stijging is aan verschillende factoren toe te wijzen. De belangrijkste is het zogenaamde gravitatie-effect, het niet uniform herverdelen van het huidige smeltende ijs over de wereld. Vlakbij de bron daalt de zeespiegel, terwijl deze iets verder weg lager dan gemiddeld stijgt. Recent zijn voor het eerst kaarten gemaakt die het geobserveerde effect van de herverdeling van het huidig smeltende ijs laten zien (Hsu en Velicogna, 2017). Hieruit blijkt dat Nederland gunstig ligt ten opzichte van het huidig smeltende ijs van Groenland, en van ijskappen en gletsjers. Dat zorgt ervoor dat het smeltende ijs nu voor een zeespiegelstijging van ongeveer $0,9$ mm/jaar zorgt aan de Nederlandse kust, terwijl het wereldwijd gemiddelde effect hiervan $1,8$ mm/jaar is.

Conclusies

Dit artikel beschrijft een vernieuwde en geactualiseerde de methode om de huidige zeespiegelstijging langs de Noordzeekust te bepalen ten behoeve van het suppletieprogramma. Deze methode laat zien dat de zeespiegel over de periode 1890 tot en met 2017 met een snelheid van $18,6$ cm per eeuw is gestegen tot 6 cm boven NAP. Er is in die periode geen sprake van een versnellende zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Een deel van de gemeten zeespiegelstijging langs de kust komt door bodemdaling ($4,5$ cm per eeuw). Het grootste deel van de jaar-tot-jaarvariaties in de zeespiegelstand is toe te schrijven aan de wind.

Doordat de zeespiegelstijging niet noemenswaardig is versneld en voor een deel uit bodemdaling bestaat is deze momenteel lager dan het laagste KNMI'14 scenario.

De Nederlandse zeespiegelstijging is niet gelijk aan de mondiale zeespiegelstijging vanwege de gunstige geografische ligging ten opzichte van het smeltend ijs én omdat het volume van de dalende oceaانبodem bij de zeespiegelstijging wordt opgeteld.

Literatuur

- Baart, F., Rongen, G., Hijma, M., Kooi, H., de Winter, R. en R. Nicolai** (2019) Zeespiegelmonitor 2018: De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust; Deltares en HKV rapport, Delft. URL <https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/Zeespiegelmonitor-2018-final.pdf> (rapport), <https://nbviewer.ipython.org/github/openearth/sealevel/blob/master/notebooks/dutch-sea-level-monitor.ipynb> (online rekendocument), <https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/faq-zeespiegelmonitor-2018-.pdf> (frequently asked questions)
- Bos, M. S., S. D. P. Williams, I. B. Araújo en L. Bastos** (2014). The effect of temporal correlated noise on the sea level rate and acceleration uncertainty; in: *Geophysical Journal International* Vol 196(3), pag 1423-1430. URL <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggt481>
- Cohen, J.** (1988) Statistical power for the behavioral sciences. Hillside.
- Church, J.A. en N.J. White** (2011) Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century; in: *Surveys in Geophysics* Vol 32, pag 585-602.
- CBS, PBL en WUR** (2018) Compendium voor de Leefomgeving; Diverse indicatoren. Centraal Bureau voor de Statistiek, Planbureau voor de Leefomgeving & Wageningen University & Research, Den Haag/Bilthoven/Wageningen. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0229-zeespiegelstand-nederland-en-mondiaal>
- Frederikse, T., Riva, R., Slobbe, C., Broerse, T. en M. Verlaan** (2016) Estimating decadal variability in sea level from tide gauge records: An application to the North Sea; in: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol 121(3), pag 1529-1545. URL <https://doi.org/10.1002/2015JC011174>
- Hijma, M. en H. Kooi** (2018). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekken (deel 2). Tech. Rep. 11202190-001-ZKS-0001, Deltares.
- Hsu, C.-W. en I. Velicogna** (2017) Detection of sea level fingerprints derived from GRACE gravity data; in: *Geophysical Research Letters* Vol 44(17), pag 8953-8961. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017GL074070>.
- Hurk, B. van den, Siegmund, P., Klein Tank, A., Attema, J., Bakker, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Boers, R., Brandsma, T., van den Brink, H., Drijfhout, S., Eskes, H. en R. Haarsma** (2014). KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century-A Netherlands perspective. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands.
- Jevrejeva, S., Moore, J., Grinsted, A., Matthews, A. en G. Spada** (2014) Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807; in: *Global and Planetary Change* Vol 113(0), Pag 11-22. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818113002750>
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White en J. Woollen** (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project; in: *Bulletin of the American meteorological Society* Vol 77(3), pag 437-472.
- Ronde, J. de** (2008) Toekomstige langjarige suppletiebehoefte; Technisch rapport Z4582.24 Deltares.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. en P.M. Midgley** (2013). Climate Change 2013 The

Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for decision-makers. Technisch rapport Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat/Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC.

- Veen, J. van** (1945) Bestaat er een geologische bodemdaling te Amsterdam sedert 1700; in: *Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap* Vol 2(62), pag 2-36.
- Visser, H., S. Dangendorf en A.C. Petersen** (2015) A review of trend models applied to sea level data with reference to the "acceleration-deceleration debate"; in: *Journal of Geophysical Research: Oceans* Vol 120(6), pag 3873-3895. URL <https://doi.org/10.1002/2015JC010716>.
- Watson, C.S., N.J. White, J.A. Church, M.A. King, R.J. Burgette en B. Legresy** (2015) Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era; in: *Nature Climate Change* Vol 5, pag 565-568. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2635>.
- Watson, P.J.** (2016) Identifying the best performing time series analytics for sea level research; in: *Time Series Analysis and Forecasting*, pages 261-278, Springer.
- Zeileis, A.** (2004). Econometric Computing with HC and HAC Covariance Matrix Estimators; in: *Journal of Statistical Software, Articles* 11 (10): 1-17. URL <https://www.jstatsoft.org/v011/i10>.

Summary Sea-level rise along the Dutch Coast: results from 128 years of stage measurements at gauging stations

The current sea level and sea level rise along the Dutch coast are important parameters for the maintenance policy of the coast, which is fundamental for flood safety and fresh water supply. Therefore, it is necessary to monitor the sea level rise carefully and get a good understanding of its behaviour in course of time. The application of a combination of data science methods, model computations and archival research has led to new insights. Observations of tidal gauging stations along the Dutch coast in the period 1890-2017 have been analysed. This analysis revealed that the rise in the sea level in the last decades is lower than observed in other parts of the world and has not shown an acceleration. The relative sea level along the Dutch coast is 1.86 mm/year of which 0.45 mm/year is due to subsidence. Global sea level rise is 3.2 mm/year. The main reason for the difference is the favourable geographic location of The Netherlands concerning melting ice (gravitation effect). This causes 0.9 mm/year of the 3.2 mm/year of sea level rise to occur near the equator instead of in the North Sea.

Auteur

R.P. NICOLAI
HKV IJN in water, Lelystad
r.nicolai@hkv.nl

F. BAART
Deltares, Delft
fedor.baart@deltares.nl

G. RONGEN
HKV IJN in water, Lelystad
g.rongen@hkv.nl

