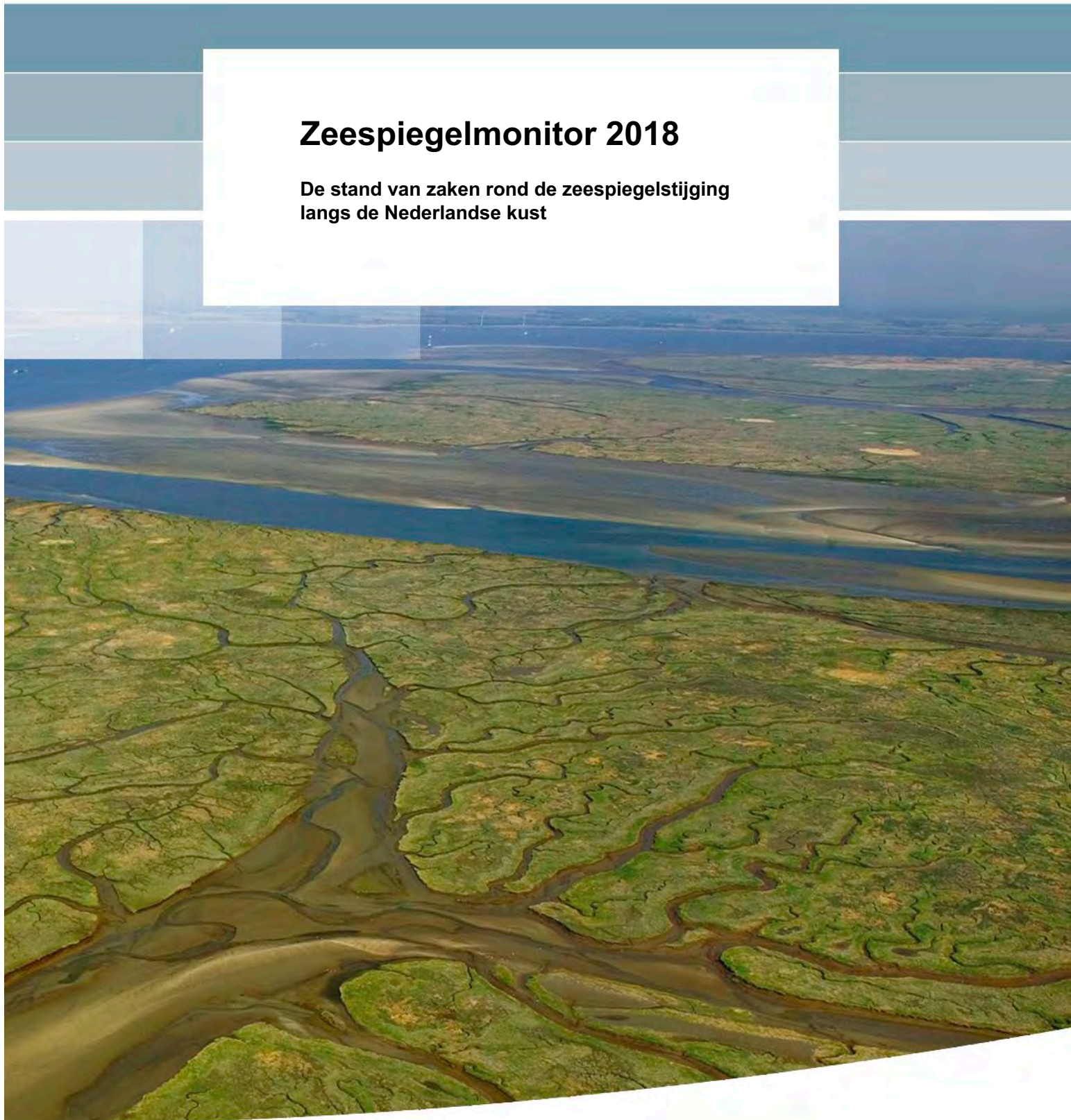


## **Zeespiegelmonitor 2018**

**De stand van zaken rond de zeespiegelstijging  
langs de Nederlandse kust**





## **Zeespiegelmonitor 2018**

**De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust**

Fedor Baart, Deltares  
Guus Rongen, HKV  
Marc Hijma, Deltares  
Henk Kooi, Deltares  
Renske de Winter, Deltares  
Robin Nicolai, HKV





## Titel

Zeespiegelmonitor 2018

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, UTRECHT	11202193-000	11202193-000-ZKS-0004	1

## Trefwoorden

Zeespiegelstijging, Getij, Klimaatverandering, Kustbeleid

## Samenvatting

Dit rapport beschrijft de onderzoeksresultaten van de zeespiegelmonitoring onderzoeksagenda 2016-2018. In de afgelopen drie jaar is gewerkt om beter inzicht te krijgen in de metingen van de zeespiegel langs de Nederlandse kust.

De zeespiegel stijgt langs de Nederlandse kust minder snel dan in de rest van de wereld. Om beter inzicht te krijgen in de oorzaak hiervan hebben we de zeespiegel verder ontrafeld. Door een combinatie van data-science, modelberekeningen en archiefonderzoek zijn we to verschillende nieuwe inzichten gekomen.

De relatieve zeespiegelstijging is in verschillende componenten ontbonden. We zien dat van de huidige zeespiegelstijging van 18.6 centimeter per eeuw 4.5 centimeter bestaat uit bodemdaling, gemeten over de periode 1890 tot en met 2017. In 1993 zijn we de zeespiegel ook gaan meten met satellieten. Hierdoor wordt de globale zeespiegelstijging ingeschat op 32cm/eeuw over de periode 1993-2017. De belangrijkste verklaring waarom we maar zo weinig zien van de globale zeespiegelstijging is omdat Nederland op een van de meest gunstige plekken ter wereld ligt, 9cm/eeuw is niet bij Nederland terecht gekomen, maar rond de evenaar. Een ander deel van de verklaring is dat globale trends over verschillende periodes niet "volume behoudend" worden berekend.

Veel van de variatie van jaar tot jaar is toe te schrijven aan de opstuwende kracht van stormen. We hebben gekeken of het effect van stormen op de kust beter kunnen inschatten. Door rekening te houden met wind, luchtdruk en langjarig getij kunnen we de stijging van de zeespiegel betrouwbaar vaststellen en snel zien of de zeespiegelstijging veranderd.

De zeespiegel langs de Nederlandse kust is niet versneld. Dit hadden we wel verwacht op basis van oude projecties. Dit is belangrijk in de context van welk zeespiegelindicator gebruikt wordt voor verschillende toepassingen. De stijging van de Nederlandse zeespiegel wordt onder andere gebruikt om te bepalen hoeveel met hoeveel zand de kust versterkt moet worden. We adviseren om de huidige zeespiegelstijging te gebruiken voor toepassingen tot maximaal 15 jaar vooruit. Dit sluit aan bij het advies van de adviescommissie van het Expertise Netwerk Water. Voor ontwerpen, beheersvragen en planologische vragen met een langere zichtduur adviseren we om op scenario gebaseerde projecties worden gebruikt.

Uit de analyse van de historie van het NAP is naar voren gekomen dat de nulpalen van Delfzijl in 1973 uit het NAP zijn gehaald. Hierdoor is de bodemdaling bij Delfzijl niet in de gemiddelde zeespiegel opgenomen. Wel is hierdoor onopgemerkt gebleven dat de zeespiegel door de gaswinning 23cm extra is gestegen bovenop de gemiddelde zeespiegelstijging van 19cm per eeuw in Delfzijl. Dit onderschrijft de relevantie van periodiek onderzoek naar de reproduceerbaarheid van de verschillende bronnen die we gebruiken om beslissingen te nemen over het Nederlands kustbeleid.

We adviseren om kritisch te kijken naar de discrepantie tussen de gemeten zeespiegel en de zeespiegelstijging die we in het verleden voor de toekomst geprojecteerd hebben. We kunnen beter gaan meten, bijvoorbeeld door alle getijstations met GNSS apparatuur uit te rusten. In de komende jaren zal gewerkt worden aan een betere ontsluiting van zeespiegelinformatie via de publieke kanalen van Rijkswaterstaat.

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Aansluiting bij eerder onderzoek	12
1.2	Onderzoeksvragen	13
1.3	Leeswijzer	14
1.4	Review	14
<b>2</b>	<b>Oorzaken relatieve zeespiegelstijging</b>	<b>15</b>
2.1	Methoden	15
2.2	Globaal	16
2.2.1	Sinds de laatste ijstijd	18
2.2.2	Temperatuur	18
2.2.3	Massaveranderingen, gletsjers, landijs en zeeijs	20
2.3	Regionaal en lokaal	22
2.3.1	Gravitatie	22
2.3.2	Circulaties	23
2.3.3	Luchtdruk	25
2.3.4	Getij	25
2.3.5	Bodemdaling	26
<b>3</b>	<b>Toepassingen</b>	<b>31</b>
3.1	Kustbeheer	31
3.2	Delfstoffenwinning	32
3.3	Ontwerp	33
3.4	Toetsing/beoordeling	34
3.5	Percentage onder zeeniveau	34
3.6	Zeespiegel over 200 jaar	35
3.7	Trends in toepassingen van de zeespiegel	36
<b>4</b>	<b>Metingen</b>	<b>39</b>
4.1	Getijdestations	39
4.1.1	Vlissingen	41
4.1.2	Hoek van Holland	41
4.1.3	IJmuiden	41
4.1.4	Den Helder	41
4.1.5	Harlingen	42
4.1.6	Delfzijl	42
4.2	Verticale referentieniveaus	42
4.2.1	Het Normaal Amsterdams Peil (NAP) en de nulpalen	43
4.2.2	NAP historie	44

4.3	Satellieten . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Methoden voor de bepaling van de huidige zeespiegel</b>	<b>47</b>
5.1	Welk model? . . . . .	47
5.2	Welke data? . . . . .	48
5.3	Welke tijdschaal? . . . . .	48
5.4	Welke termen? . . . . .	49
5.4.1	Constante en trend . . . . .	49
5.4.2	Versnelling? . . . . .	49
5.5	Getij . . . . .	50
5.6	Wind . . . . .	50
5.7	Residu . . . . .	51
5.8	Gedetailleerde vergelijking . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Resultaten: de huidige zeespiegel</b>	<b>53</b>
6.1	De huidige zeespiegel . . . . .	53
6.2	Versnelt de zeespiegelstijging? . . . . .	54
6.3	Wanneer gaan we de versnelling zien als deze heeft plaatsgevonden? . . . . .	54
6.4	Per station . . . . .	56
6.5	Bodemdaling of zeespiegelstijging? . . . . .	57
6.6	Scenario's versus de huidige zeespiegel . . . . .	58
6.7	Nederland versus buurlanden . . . . .	61
6.8	Nederland versus globaal . . . . .	61
6.9	Vergelijking met satellietmetingen . . . . .	64
6.10	Modelkeuzes en aannames . . . . .	65
6.11	De volgende generatie: heranalyses voor wind en getij . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Discussie</b>	<b>67</b>
7.1	Versnelling . . . . .	67
7.2	Toepassing . . . . .	69
7.3	Nederland onder zeespiegel . . . . .	70
7.4	Hoe relatief willen we meten? . . . . .	70
7.4.1	Verschillen binnen Nederland . . . . .	71
<b>8</b>	<b>Conclusie</b>	<b>73</b>
8.1	Antwoorden . . . . .	73
8.2	Aanbevelingen . . . . .	73
8.3	Vervolgonderzoek . . . . .	74
<b>9</b>	<b>Referenties</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>Bijlagen</b>	<b>93</b>
10.1	Reproduceerbaarheid zeespiegelmonitor . . . . .	93
10.2	Reproduceerbaarheid zeespiegelprojecties . . . . .	101

10.3	Reproduceerbaarheid zeespiegelmetingen . . . . .	109
10.4	Advies gebruik methode Frederikse in de zeespiegelmonitor . . . . .	117
10.5	Zeespiegelmonitor: Eenduidige zeespiegelindicatoren . . . . .	123
10.6	Invoering nulpalen . . . . .	180
10.7	Nulpalen en bodemdaling . . . . .	186



## 1 Inleiding

In dit rapport wordt de actuele stand en stijging van de zeespiegel langs de Nederlandse kust beschreven. Deze huidige zeespiegel is belangrijk voor het Nederlandse kustbeleid. De Nederlandse kust is fundamenteel voor onze veiligheid, drinkwatervoorziening, ecologie en recreatie.


Het handhaven van de kustlijn en het handhaven van 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. Het landelijke kustbeleid is geformuleerd in de 3e Kustnota ([Rijkswaterstaat, 2000](#)), Nota Ruimte ([VROM, 2004](#)), het Nationaal Waterplan ([Verkeer en Waterstaat, 2008](#)), de Nationale Visie Kust en Beslissing Zand ([Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken, 2013, 2014](#)). Er wordt gehandhaafd door morfologische interventies in de vorm van zandsuppleties.

Het benodigde zandvolume wordt in essentie bepaald door het oppervlak van een deel van het kustfundament maal de zeespiegelstijging. Voor elke millimeter per jaar zeespiegelstijging wordt 7 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd ([De Ronde, 2008](#)). Er wordt naar gestreefd het gehele kustfundament, inclusief de landzijde mee te laten groeien ([Verkeer en Waterstaat, 2008](#)).

In de laatste jaren is de hoeveelheid tijdelijk teruggebracht. Er is meer zand blijven liggen dan verwacht na de aanleg van de kustversterkingen. Daardoor is er voor het handhaven van de Basis KustLijn ([BKL](#)), tijdelijk minder zand nodig. De [BKL](#) is de kustlijn zoals die op 1 januari 1990 lag en is sindsdien een aantal keer herzien. De kustlijn wordt dynamisch gehandhaafd.

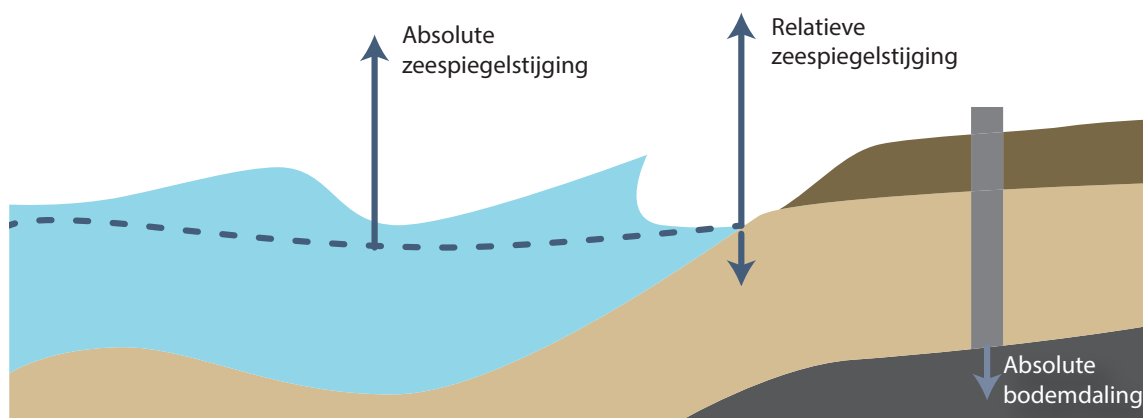
De directe koppeling tussen kustfundament, zeespiegelstijging en suppletievolume maken het doelmatig suppleren en de precieze bepaling van de zeespiegelstijging en het kustfundament tot relevante onderzoeksthema's. In het programma 'Kustgenese 2' wordt toegewerkt naar een verdere uitwerking van deze aanpak. De grenzen van het kustfundament worden opnieuw bepaald. De uitwisseling tussen het kustfundament en de bekkens (Waddenzee, Westerschelde) wordt geschat en er wordt gekeken naar uitwisselingen van sediment over de landsgrenzen. Daarnaast, en belangrijk voor dit onderzoek, wordt ook de relatieve zeespiegelstijging verder uitgesplitst in een schatting van absolute bodemdaling en absolute zeespiegelstijging. Relatieve zeespiegelstijging is de stijging van de zeespiegel ten opzichte van het land, de som van de absolute zeespiegelstijging en de daling van het landgebonden referentievlak, zie fig. 1.1 en de nadere uitwerking in [Dillingh et al. \(2010\)](#).

In de context van kustbeheer wordt onder de 'zeespiegel' verstaan de over langere tijd gemiddelde hoogte van het zeeoppervlak, waaruit de korte termijn fluctuaties (windgolven, getij, windopzet etc.) nagenoeg zijn verdwenen. Wat overblijft is de geleidelijke verandering van de hoogte van het zeeoppervlak. Dit wordt nader uitgewerkt in hoofdstuk 5.

De 'huidige zeespiegel' is een kenmerkende waarde die wordt gebruikt voor de bepaling van de benodigde omvang van de zandsuppleties. Een kenmerkende waarde is een afgeleide statistiek, ook wel kengetal of indicator genoemd, die gekoppeld is aan een strategisch doel ([Van Koningsveld et al., 2005](#)). De methode van het bepalen van deze waarde wordt in dit rapport beschreven. De jaarlijks bepaalde waarde wordt elk jaar geactualiseerd in de online zeespiegelmonitor .

De zeespiegelstijging wordt niet alleen voor de kust gebruikt maar ook voor de beperking van gaswinning onder de Wadden, het ontwerp van dijken en om te bepalen waar je wel en





Figuur 1.1: Relatieve versus absolute zeespiegelstijging.

niet mag bouwen in de buurt van de kust. In dit rapport geven we een overzicht van welke zeespiegelindicatoren in gebruik zijn voor de verschillende toepassingen. Voor een deel van deze indicatoren wordt gebruik gemaakt van zeespiegelprojecties. Deze worden met actuele metingen vergeleken.

### 1.1 Aansluiting bij eerder onderzoek

Nederland kent een lange geschiedenis in het systematisch meten van de zeespiegel (uurlijks sinds 1700) en de zeebodem en kusttopografie (jaarlijks sinds 1964). Deze metingen hebben bijgedragen aan doelmatig (Van Koningsveld and Mulder, 2004) en “evidence based” (Begum *et al.*, 2007; Portman *et al.*, 2012) kustbeheer. In die lijn passen ook de onderzoeken, waar dit een vervolg op is, van Dillingh *et al.* (2010), De Ronde *et al.* (2014) en Baart *et al.* (2015a). De term “evidence based” is overgewaaid uit het Verenigd Koninkrijk en de volksgezondheid (Nutley *et al.*, 2000; Sanderson, 2002).

In Dillingh *et al.* (2010) werd een eerste definitie gegeven van de zeespiegelstijging in de context van het suppletie beleid. Er werd bepaald dat rekening gehouden moet worden met geodetische datum verandering (NAP-correctie) en met fysische processen (nodaal getij, zie sectie 2.3.4, luchtdruk, zie sectie 2.3.3). Er werd gevonden dat er geen statistisch aantoonbare versnelling in de zeespiegelstijging plaats vond over de periode 1890-2008. Een indicatie voor een versnelling werd wel gevonden met een meer exploratieve aanpak. Het al dan niet optreden van een versnelling is relevant omdat daardoor de te suppleren hoeveelheid zand toeneemt. Daarnaast werd een eerste koppeling gemaakt tussen de zeespiegel observaties (het statistische model) en de zeespiegel projecties van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Tenslotte hebben Dillingh *et al.* (2010) de satelliet metingen van de absolute zeespiegel vergeleken met de metingen van de getijstations.

In Dillingh (2013) werden de huidige zeespiegelstand en de huidige zeespiegelstijging, zoals gebruikt voor het kustonderhoud, overgenomen als een “kenmerkende waarde”. Het werd opgenomen in het overzicht met indicatoren als het gemiddeld hoog- en laagwater (slotgemiddelden), gemiddelde getijkrommen, Lowest Astronomical Tide (LAT), overschrijdingsfrequenties van hoogwater- en laagwater en de afvoercharacteristieken zoals in gebruik voor rivierbeheer.

De Ronde *et al.* (2014) hadden als doel om de schatting betrouwbaarder te maken. Dit gebeurde

door naar de statistische relatie met andere fysische processen (wind, rivierafvoer) te kijken. Ze concludeerden dat het voor de Nederlandse kust noodzakelijk is om rekening te houden met de wind. Zodoende kan veel variantie verklaard worden, waardoor een betrouwbaardere zeespiegel en zeespiegeltrend bepaald kunnen worden. Omdat de wind een negatieve trend liet zien voor het enkele station dat onderzocht werd, ontstond de vraag of misschien de onderliggende zeespiegelstijging eigenlijk te laag is ingeschat. De exploratieve methode om naar versnellingen te kijken werd veranderd (van Whittaker (Eilers, 2003) naar LOcal regrESSion (a later generalization of LOWESS) (LOESS) (Cleveland, 1979)). De satellietmetingen werden in meer detail bekeken. De Ronde *et al.* (2014) gaven aan dat in de statistische methode een hoger gewicht aan recente waarnemingen moet worden toegekend dan aan oudere waarnemingen. Daarnaast werd een aanbeveling gedaan om een schatting voor de nabije toekomst te maken op basis van zowel klimaatscenario's als metingen.

Baart *et al.* (2014) hebben de combinatie van statistische en fysische modellen verder uitgewerkt. Daarop bouwen we in dit onderzoek weer verder. Er werden voor het eerst heranalyses in de berekeningen meegenomen. Het gebruik van tijdsafhankelijke trends werd geïntroduceerd om sneller inzicht te krijgen in mogelijke versnelling.

## 1.2 Onderzoeksvragen

Dit rapport heeft als doel de volgende centrale vraagstellingen te beantwoorden. Daarnaast zijn er andere onderzoeksvragen beantwoord in diverse memo's, in de [Bijlagen](#).

- 1 Wat is een goede methode om de huidige zeespiegelstand en zeespiegelstijging te bepalen? (antwoord op pagina 47 in hoofdstuk 5)
- 2 Hoe snel stijgt de zeespiegel in Nederland? (antwoord op pagina 53 in sectie 6.1)
- 3 Is er sprake van een versnelde zeespiegel langs de Nederlandse kust? (antwoord op pagina 54 in sectie 6.2)
- 4 Hoe kunnen we de relatieve zeespiegelstijging uitsplitsen naar bodemdaling en absolute zeespiegelstijging? (antwoord op 58 in sectie 6.5)
- 5 Welk scenario van de zeespiegelstijging sluit het beste aan bij de huidige zeespiegelstijging? (antwoord op pagina 60 in sectie 6.6)
- 6 Waarom verschillen de stations langs de Nederlandse kust van elkaar? (antwoord op pagina 72 in sectie 7.4.1)
- 7 Waarom wijkt de Nederlandse zeespiegelstijging af van de wereldwijde zeespiegelstijging? (antwoord op pagina 69 in sectie 7.1)
- 8 Welke methode voor bepaling van de zeespiegel sluit aan bij welke toepassing? (antwoord op pagina 69 in sectie 7.2)

### 1.3 Leeswijzer

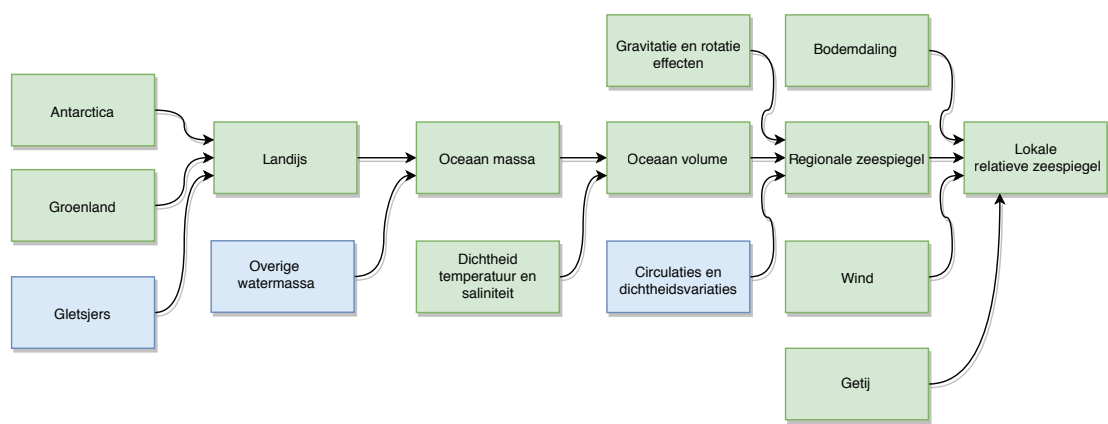
Merk op dat de paginanummers van bovenstaande vragen in de digitale versie van dit document voorzien zijn van een hyperlink. Hiermee kunt u klikken naar de juiste pagina. Dit geldt ook voor verwijzingen naar acroniemen waarmee u bij het overzicht van afkortingen kunt komen, te vinden in hoofdstuk 9. Op enkele plekken in het rapport is het  symbool opgenomen. Dat is een verwijzing naar de interactieve rekendocumenten, waarmee u zelf berekeningen uit dit rapport kunt reproduceren. Citaten in de vorm an [Author \(1954\)](#) verwijzen naar een onbekende auteur (Unknown Author), bijvoorbeeld bij krantenberichten en verwijzingen naar kamerstukken. In dit document wordt de internationale getalsnotatie met een punt (.) als decimaalscheidingsteken gebruikt. Figuren overgenomen uit internationale publicaties of bedoeld voor internationale publicaties hebben Engelse assenlabels.

### 1.4 Review

Dit rapport is geschreven in opdracht van Rijkswaterstaat als onderdeel van het Kennis voor Primaire Processen ([KPP](#)) programma kustbeleid, gefinancierd door Ministerie van Infrastructuur en Water ([IenW](#)). voorgelegd aan een aantal externe experts. Wij bedanken hen voor het constructieve commentaar, met name Cornelis Slobbe (TU Delft), Jaap Breunese (TNO), Dewi le Bars (KNMI), Gerrit Burgers (Rijkswaterstaat), Herman Peters (Rijkswaterstaat), Rena Hoogland (Rijkswaterstaat), Quirijn Lodder (Rijkswaterstaat) en Robert Vos (Rijkswaterstaat).

## 2 Oorzaken relatieve zeespiegelstijging

De zeespiegel wordt beïnvloed door verschillende processen die variëren in tijd en ruimte (zie bijvoorbeeld [Pickard and Emery, 2016](#)). Een deel van de zeespiegelveranderingen aan de Nederlandse kust vindt zijn oorsprong in de globale zeespiegelstijging en een deel vindt zijn oorsprong in regionale (in de Noordzee) en lokale oorzaken (langs de Nederlandse kust). Dit is weergegeven in fig. 2.1. Dit overzicht sluit aan bij de indeling die het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gebruikt ([Stocker et al., 2013a](#)). In dit rapport maken we, waar mogelijk, gebruik van actuele gemeten gegevens, bij voorkeur op basis van publiek beschikbare gegevensbronnen.



*Figuur 2.1: Overzicht van oorzaken van de lokale relatieve zeespiegelstijging. De groene onderdelen komen in dit hoofdstuk aan bod. Tijdschalen in de orde van jaren tot decaden. Links de globale oorzaken doorvertaald naar rechts, de lokale oorzaken.*

Naast de fysische oorzaken zijn er diverse methodologische keuzes die de hoogte van de zeespiegel bepalen. De diverse metingen hebben onnauwkeurigheden en de beperkte historische dekking van de metingen kan voor vertekening zorgen.

Welke regionale en lokale aspecten van de zeespiegel belangrijk zijn varieert per gebied. De Noordzee is onderdeel van het continentaal plat van Europa en is daardoor relatief ondiep. Door deze ondiepte zijn getij en windopzet de belangrijkste processen die bijdragen aan variaties in de zeespiegel langs de Nederlandse kust op de tijdschaal van jaren tot decaden.

Wereldwijd wordt doorgaans gekeken naar de absolute zeespiegelstijging. De term absolute zeespiegel wordt gebruikt voor de hoogte ten opzichte van de geoïde, het vlak dat het water zou volgen als er geen wind, getij en stroming zouden zijn in de oceaan. Lokaal is vooral relatieve zeespiegelstijging interessant, de combinatie van bodemdaling en absolute zeespiegelstijging.

### 2.1 Methodes

Er zijn verschillende methodes om aspecten van de zeespiegelstijging te kwantificeren.

**Boekhouden** In deze aanpak probeert men op grote schaal een balans op te stellen van verschillende componenten die bijdragen aan een fenomeen. Ook voor zeespiegelstijging

worden er budgetten opgesteld. Het resultaat van deze aanpak is antwoorden op vragen als, waar komt de meeste zeespiegelstijging vandaan, van Antarctica of van Groenland? Met een gegeven lijstje oorzaken, kan er gekeken worden welke bijdragen welke grootte hebben. Men maakt gebruik van beschrijvende statistiek en bij voorkeur van gemeten data.

**Data science** De data science aanpak richt zich meer op het detecteren en inschatten van veranderingen en het vergelijken van verschillende theorieën. Is er een versnelling zichtbaar in het afkalven en smelten van ijs op Antarctica? Welk deel van de trend is lange en welk deel is korte termijn? Men maakt gebruik van exploratieve, lerende en generatieve modellen. Dit gebeurt op basis van gemeten data en gesimuleerde data.

**Simuleren** Als processen goed begrepen worden kunnen ze ook in een numeriek model gevat worden. Hiermee kunnen processen gesimuleerd worden. Dit wordt gebruikt voor het creëren van heranalyses (bijgestuurd door metingen) en bij het doorrekenen van scenario's naar projecties.

De uitdaging in het kwantificeren van de zeespiegel is om spaarzaam een verzameling van processen te kiezen waar rekening mee gehouden wordt. Alle processen tegelijk beschouwen is niet behapbaar, conceptueel, qua data beschikbaarheid en rekentechnisch.

Dit rapport gebruikt alle drie de aanpakken. In de beschrijving van de globale zeespiegel ligt de nadruk wat meer op de boekhoud aanpak. Voor de bepaling van de huidige zeespiegel wordt gebruik gemaakt van data science en geassimileerde heranalyses.

## 2.2 Globaal

De globale zeespiegelveranderingen (gemiddeld over alle oceanen) wordt grotendeels veroorzaakt door twee componenten (Zie bijvoorbeeld [Chambers et al., 2017](#)). Beide componenten zorgen ervoor dat het oceaankvolume toeneemt.

**Dichtheid** Het oceaankwater wordt warmer doordat de oppervlaktetemperatuur stijgt. Hierdoor neemt de dichtheid af.

**Oceaan massa** De massa van de oceaan neemt toe doordat landijs afkalft of smelt.

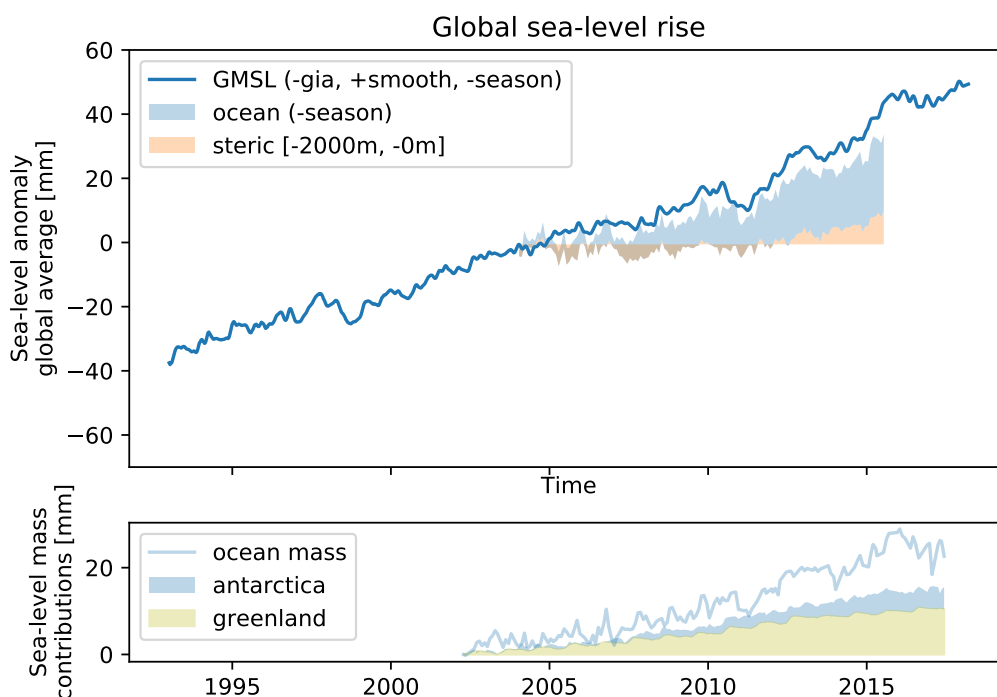
Een overzicht van de uitsplitsing van de globale zeespiegelstijging, over de periode 1990-2017 is te vinden in fig. 2.2 [\[4\]](#). Deze uitsplitsing wordt gebruikt om te kijken of de verschillende metingen met elkaar in overeenstemming zijn. In dit geval zijn de zeespiegelmetingen op basis van de verschillende altimetrie satellieten (TOPEX/Poseidon, Joint Altimetry Satellite Oceanography Network ([JASON](#)) 1,2,3) vergeleken ([Zlotnicki et al., 2016](#)) met de oceaan massa op basis van de Gravity Recovery and Climate Experiment ([GRACE](#))-missie ([Watkins et al., 2015](#)) en de sterische informatie op basis van de Argo, vernoemd naar schip uit de Griekse mythologie ([Argo](#)) dataset ([Llovel et al., 2014](#)). Sterisch slaat op de verandering in krachten tussen moleculen door temperatuursverandering (thermosterisch) of veranderingen in de de saliniteit, het zoutgehalte in water (halosterische effect).

Om de grafieken op elkaar aan te laten sluiten worden diverse correcties en filters toegepast. In fig. 2.2 zijn bijvoorbeeld de seizoenseffecten verwijderd, de data is gefilterd met een lopend gemiddelde, zodat deze er wat minder grillig uitzien. Er is een correctie doorgevoerd voor de

Glacial Isostatic Adjustment, postglaciale opheffing (GIA). De oceaانبodem zakt waardoor het oceaanvolume toeneemt. Bij een constant zeeniveau stijgt na het toepassen van deze correctie de globale zeespiegel met 0.3mm/jaar. Er zijn goede metingen van ijsmassaveranderingen beschikbaar sinds de start van de GRACE missie in 2002. De globale dekking van sterische effecten, op basis van het Argo programma begint in 2004.

In het bovenste paneel van fig. 2.2 is te zien dat de sterische component (tot 2000m diep) en de toename van de oceaan massa de zeespiegelstijging voor hun rekening nemen. Over deze periode komt de meeste zeespiegelstijging door de toename van massa van de oceaan (bovenste paneel) en dan met name door het afsmelten en afkalven van het ijs op Groenland (onderste paneel).

Een nadere beschouwing van deze balans is uitgewerkt door een groep wetenschappers (Cazenave et al., 2018) die zich daar als onderdeel van het World Climate Research Programme (WCRP) mee bezig hebben gehouden. Ze komen tot de conclusie dat de gemeten zeespiegel-trend 0.37 mm/jaar hoger is dan verwacht op basis van de boekhouding over de periode 1993 - 2017. Over deze periode schatten ze de bijdrage van toename van massa op 1.4mm/jaar en de toename door temperatuurstoename op 1.3mm/jaar.



Figuur 2.2: Bovenste paneel: uitsplitsing van globale zeespiegelstijging Global Mean Sea Level, globaal gemiddeld zeeniveau (GMSL) naar verschillende componenten (ocean: oceaan massa, steric sterische bijdrage). Onderste paneel uitsplitsing van oceaan massa in oorsprong van Groenland en Antarctica. De seizoensvariatie is in beide figuren verwijderd [\[4\]](#).



### 2.2.1 Sinds de laatste ijstijd

De laatste keer dat de zeespiegel zo hoog stond als tegenwoordig was aan het einde van laatste interglaciale periode (McKay *et al.*, 2011), ongeveer 120 duizend jaar terug. Tijdens deze periode stond de zeespiegel 6 tot 9m hoger dan nu (Kopp *et al.*, 2009; Dutton *et al.*, 2015). Tijdens de laatste ijstijd, het Weichselglaciaal, daalde de zeespiegel. Zo'n 21 duizend jaar terug werd het laatste dal bereikt op 125 m onder huidig zeeniveau. Sindsdien is de zeespiegel aan het stijgen, met een snelheid in de orde van tientallen mm/jaar tot enkele mm/jaar fig. 2.3. De grootste stijging, 20m in 500jaar vond plaats tijdens de periode van 14.5 duizend jaar voor heden tot 14 duizend jaar voor heden. Deze periode wordt Meltwater Pulse (MWP)-1A genoemd. Er is discussie in de literatuur of de bron Noord Amerika of Antarctica is (Deschamps *et al.*, 2012).

Gek genoeg is de zeespiegelstijging over de laatste eeuwen lastiger te bepalen dan over de laatste duizenden jaren. In Nederland meten we al sinds 1700, maar door het gebrek aan een hoogtemodel en de lokale verzakkingen zijn de gegevens als ongeschikt voor het bepalen van de zeespiegelstijging aangemerkt (Van Veen, 1945). Daarom kijken we normaal gesproken pas naar de gegevens vanaf 1890. Goede historische bronnen zijn schaars. Een mooi voorbeeld is de analyse van schilderijen van Venetië waaruit bleek dat de relatieve zeespiegel daar sinds 1700 constant stijgt (Camuffo *et al.*, 2017). Andere veelgebruikte bronnen zijn gegevens uit zoutmoerassen, zie bijvoorbeeld (Kemp *et al.*, 2011). De zeespiegelstijging over een periode in de orde van duizenden jaren kan bepaald worden op basis van koolstofdatering (Libby, 1946) van geologische lagen (Shepard and Suess, 1956).

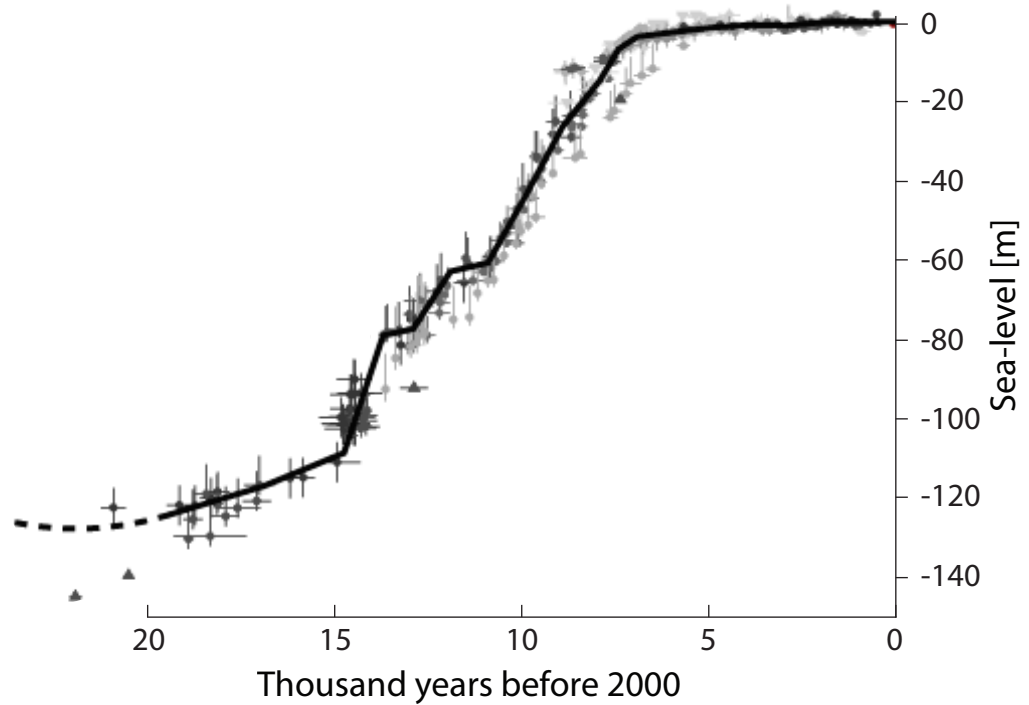
Het is duidelijk dat de zeespiegel in de 20e eeuw sneller steeg dan enkele honderden jaren terug, tijdens de zogenaamde 'kleine ijstijd' (zie bijvoorbeeld Buisman and Engelen, 2006) die duurde van de 15e tot en met de 19e eeuw. Over het antwoord op de vraag wanneer de zeespiegel precies is gaan versnellen (het 'inflexion' punt) is minder consensus. Gehrels and Woodworth (2013) geven een overzicht van inflexiepunten variërend van tweehonderd jaren terug tot hun eigen conclusie dat de versnelling begonnen is in 1925. Voor de bepaling van de huidige zeespiegel is deze discussie niet relevant. Deze discussie wordt vooral gevoerd in de context van het toeschrijven van de huidige zeespiegelstijging aan menselijk handelen.

### 2.2.2 Temperatuur

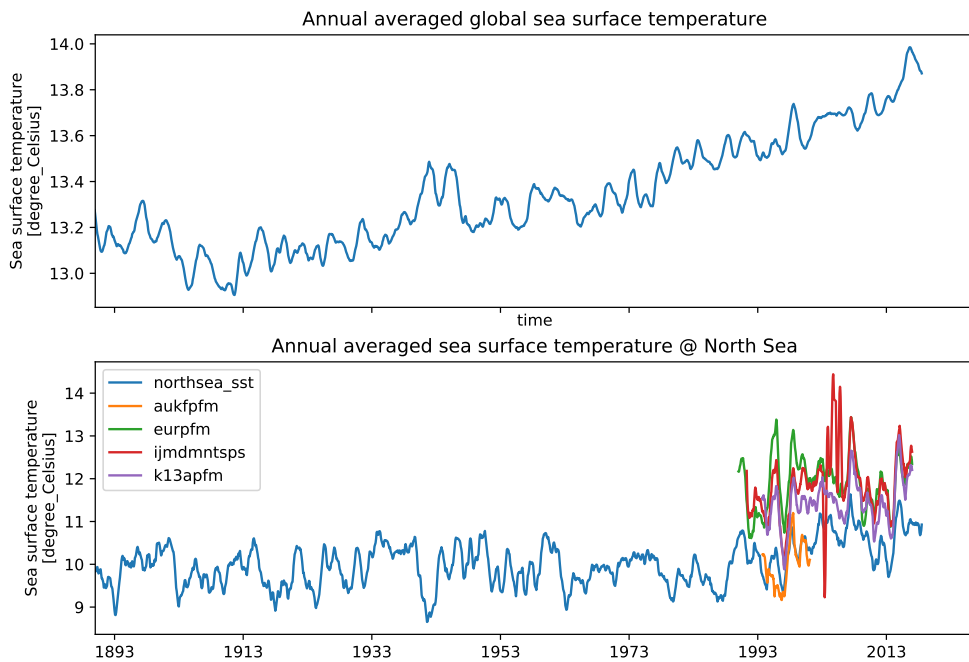
Een belangrijke factor in de trend van de zeespiegel is de temperatuur van de oceanen. Als de temperatuur stijgt, stijgt de zeespiegel doordat warmer water een lagere dichtheid heeft. Zoet water heeft de hoogste dichtheid bij 4°C, hoe zouter het water hoe lager de temperatuur met de hoogste dichtheid (Caldwell, 1978). Van de temperatuur van het oppervlakte van de oceaan zijn lange meetreeksen en heranalyses beschikbaar (Huang *et al.*, 2017). Uit deze reeks blijkt dat de temperatuur van oceaan, nadat deze in de kleine ijstijd flink was gezakt (Voosen, 2017), weer aan het stijgen is fig. 2.4.

Langs de Nederlandse kust is de temperatuur niet gestegen tot 1990. Dit is te zien in de heranalyses van de oppervlaktetemperatuur uit Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), versie 5. De Noordzee is begin jaren 1990 met ongeveer een graad gestegen (blauwe lijn in onderste subfiguur in fig. 2.4), (voor discussie zie Emeis *et al.*, 2015). De metingen van het Landelijk Meetnet Water (LMW) starten na deze veranderingen.

Voor de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust is het belangrijk om naar de globale zee-watertemperatuur te kijken. Als de temperatuur van alle oceanen in de wereld stijgt zorgt dat ook voor zeespiegelstijging in Nederland. Als alleen de Noordzee warmer wordt dan verdeelt dat water zich. Doordat de Noordzee ondiep is, is het effect van de uitzetting beperkt.



Figuur 2.3: Relatieve zeespiegelstijging sinds de laatste ijstijd, gebaseerd op figuur van Robert A. Rohde (gebruikt in verschillende publicaties, oorspronkelijke bron wikipedia). Zie Lambeck et al. (2014) voor een wetenschappelijke beschouwing.



Figuur 2.4: Zeespiegeloppervlakte temperatuur, globaal (ERSST v5) en in de Noordzee (ERSST v5 en Rijkswaterstaat (RWS) stations) [\[4\]](#).

Eigenlijk is niet de temperatuur van het oceaanoppervlak van belang, maar de oceaantemperatuur over de hele diepte van de oceaan. Met dit doel is begin van de eeuw een globaal programma van boeien opgezet, het [Argo](#) programma. Deze 3900 boeien kunnen naar beneden duiken en zo de zoutgradiënt, druk en temperatuur meten over de bovenste 2000m van de oceaan. Er wordt gewerkt aan de uitbreiding tot 6000m diep ([Jayne et al., 2017](#)), zie ook [Talley et al. \(2016\)](#) voor een overzicht van metingen van schepen. Op basis van deze data wordt een schatting gemaakt van de veranderingen in dichtheid ([Roemmich and Gilson, 2009](#)) en deze wordt beschikbaar gesteld in een dataset. Op basis van de combinatie van zeespiegelmetingen, zwaartekrachtmetingen en dichtheid is de conclusie getrokken dat de diepe oceaan, dieper dan 2000 meter, niet opwarmt ([Llovel et al., 2014](#)). [Purkey and Johnson \(2010\)](#) schatten de bijdrage van de diepe oceaan aan de zeespiegelstijging op ongeveer 0.1mm/jaar. De schatting van de zeespiegelbijdrage van de bovenste 2000m bedraagt 1.1mm/jaar op basis van data van [Llovel et al. \(2014\)](#); [Roemmich and Gilson \(2009\)](#), zoals weergegeven in sectie 2.2.

### 2.2.3 Massaveranderingen, gletsjers, landijs en zeeijs

Sectie 2.2 liet zien dat ongeveer 1.8 mm/jaar van de globale zeespiegelstijging kan worden toegeschreven aan veranderingen in massa. De massaverandering bestaat uit het verplaatsen van massa, door:

- ◇ Afvoer van land (rivieren, ijsmassa's, gletsjers, grondwateronttrekkingen)
- ◇ Opslag op land (afdamming)
- ◇ Verdamping
- ◇ Neerslag

Voor de schatting van de bijdrage van zeespiegelstijging wordt vooral naar veranderingen in ijsmassa en massa van gletsjers gekeken. Vaak worden opslag op en onttrekkingen uit het land tegen elkaar weggestreept ([Stocker et al., 2013b](#)). Er wordt gewerkt om het effect van onttrekkingen van grondwater ([Wada et al., 2010, 2017](#)), de extra opslag in kaart te brengen ([Donchyts et al., 2016](#)) en om de totale watermassa op land te meten (zie bijvoorbeeld [Chen et al., 2016](#)).

Als gletsjers smelten dan kan dat water uiteindelijk in zee stromen. Daarnaast kunnen het water en ijs verdampen en als neerslag in zee terecht komen. Het in detail uitsplitsen van de hydrologische cyclus is, in de context van zeespiegelonderzoek, niet gebruikelijk. Door de lancering van de [GRACE](#) missie in 2002 en de opvolger Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on ([GRACE-FO](#)) in 2018, een tandem van twee satellieten, kan de lokale massa worden geschat. Daardoor kan een steeds betere massabalans opgesteld worden. Schattingen van de massa van gletsjers, het landijs op Groenland en op Antarctica worden ook gemaakt op basis van data uit de [GRACE](#) missies. Op Antarctica ligt de grootste massa van ijs,  $27\text{Mkm}^3$  of een equivalent van 58m zeespiegelstijging ([Fretwell et al., 2013](#)).

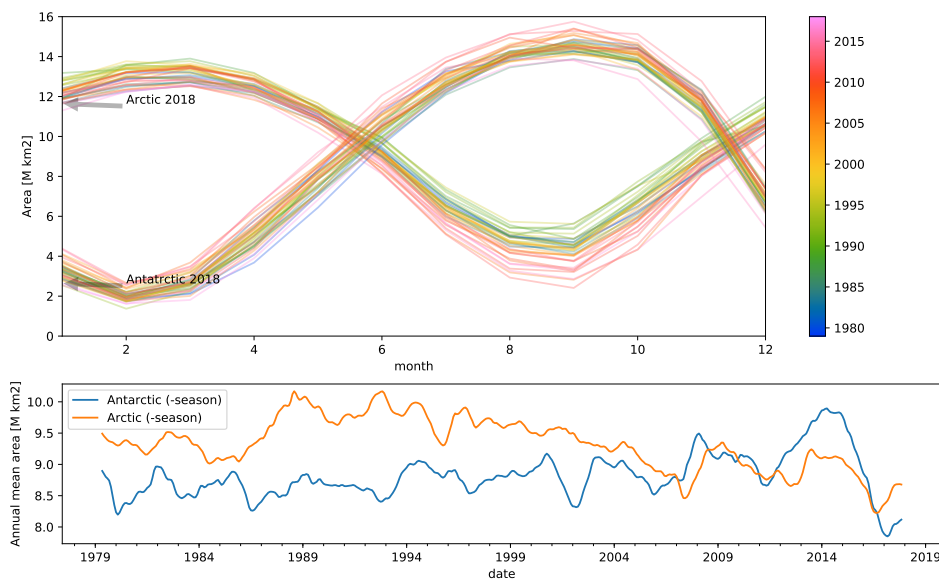
Een overzicht van verschillende studies naar smelten van gletsjers is te vinden in bijvoorbeeld [Gardner et al. \(2013\)](#). Daaruit blijkt dat veruit het grootste deel van de huidige gletsjers nog steeds massa verliest. Eerdere studies wezen op een sterk versneld massa verlies van gletsjers, maar op basis van [GRACE](#) metingen is de bijdrage van smeltende gletsjers nog steeds in de orde van 0.4 mm/jaar tot 0.8 mm/jaar aan de zeespiegelstijging. Dit is met uitzondering van

gletsjers die op Groenland en Antarctica liggen, omdat deze al in het afkalven en smelten van de ijskappen wordt meegenomen.

De dataset van [Watkins et al. \(2015\)](#) maakt het mogelijk om een schatting te maken van de massa veranderingen. Over de periode 2003 tot 2018 is er een 3000Gt aan ijsmassa verdwenen van Groenland. Dat komt overeen met een globale zeespiegelstijging van 8 mm over 15 jaar en dus 5.3 cm/eeuw. Als 360 Gt ijs smelt dan komt dat overeen met 1 mm zeespiegelstijging op basis van de dichtheid en het oppervlak van de oceanen. De massa verandering op Antarctica was de helft van Groenland, 1500Gt. Dat komt overeen met 4 mm of 2.7 cm/eeuw. Zie ook een analyse van een langere reeks aan gegevens door [Team \(2018\)](#).

Het afsmelten van zeeijs heeft geen direct effect op de zeespiegel. Het ijs op de Noordpool ligt al in het water en drukt het water (wet van Archimedes) opzij met zijn eigen massa. Toch kijken we ook naar het zeeijs in de context van zeespiegelstijging. Het zeeijs zorgt voor een meer reflectief oppervlak. Het smelten van ijs is een drijvende kracht achter de thermohaliene circulatie, ook wel bekend als de Noord-Atlantische Diepwaterpomp, zoals beschreven in sectie 2.3.2. Op Antarctica en Groenland werkt het zeeijs kan als tegenkracht tegen het afbrokkelen van het landijs.

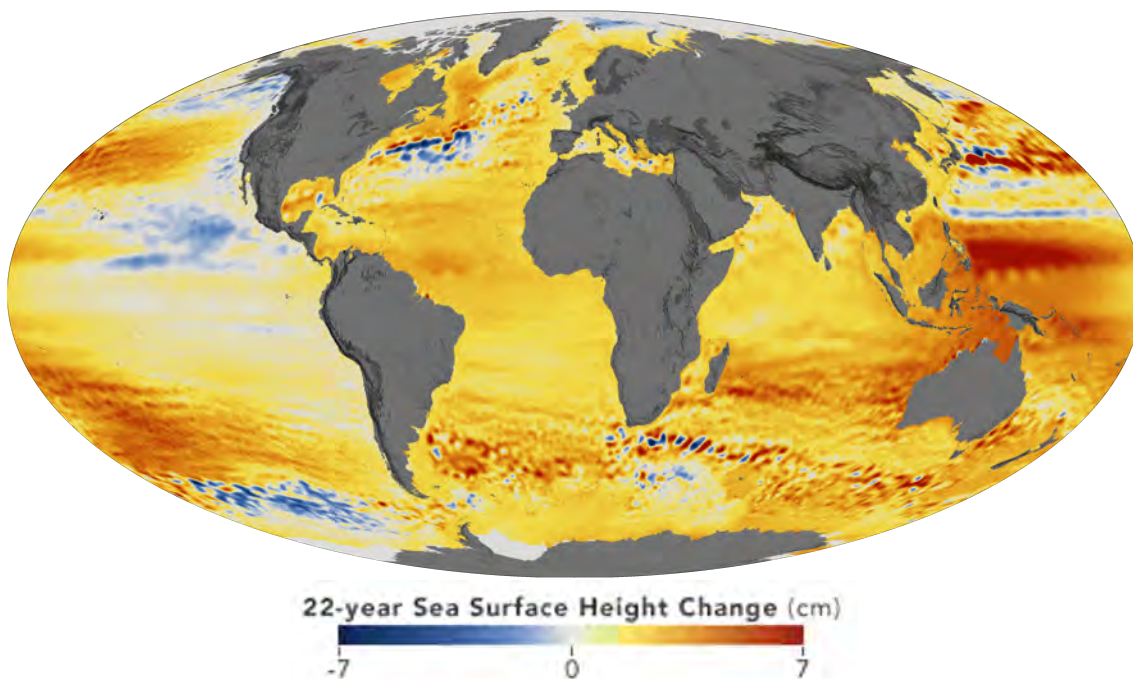
De trends van het zeeijsoppervlak zijn weergegeven in fig. 2.5, op basis van [Fetterer et al. \(2017\)](#). Het oppervlak van het zeeijs van de Noordpool is sinds 1989 aan het dalen. Het oppervlak van het zeeijs van de Zuidpool steeg gestaag tot 2015, toen is het oppervlak abrupt gekrompen.



Figuur 2.5: Zeeijsoppervlak veranderingen. Bovenste paneel Antarctische en Arctische zeeijsoppervlak, per maand en jaar weergegeven. Onderste paneel Antarctische zeeijsoppervlak (blauw) en Arctische (oranje), gecorrigeerd voor seizoenseffecten [\[1\]](#). Data: ([Fetterer et al., 2017](#)).

## 2.3 Regionaal en lokaal

De voorgaande secties bespraken verschillende oorzaken die ervoor zorgen dat de globale zeespiegel stijgt. Dat betekent echter niet dat overal op de aarde de zeespiegel even snel stijgt. Integendeel, er zijn plekken op de wereld waar de relatieve zeespiegel daalt, bijvoorbeeld in Scandinavië en er zijn plekken op de wereld waar de zeespiegel veel sneller stijgt dan in Nederland, bijvoorbeeld ten oosten van de Filipijnen fig. 2.6. De processen die de zeespiegel regionaal (de Noordzee versus andere zeeën) beïnvloeden zijn gravitatie effecten, oceaancirculaties en luchtdrukverschillen (zie bijvoorbeeld [Stammer et al., 2013](#)). Lokaal, langs de Nederlandse kust, is het van belang om ook te kijken naar wind opzet en het getij. Voor de functies van de kust is de relatieve zeespiegelstijging van belang, de combinatie van absolute zeespiegelstijging en absolute bodemdaling. Daarnaast is voor het land achter de kust ook de absolute bodemdaling van belang om te bepalen hoe de overstromingsgevoeligheid toe neemt.



Figuur 2.6: Overzicht van zeespiegel trends op basis van satellietmetingen (1993-2014) ([Zlotnicki et al., 2016](#)).

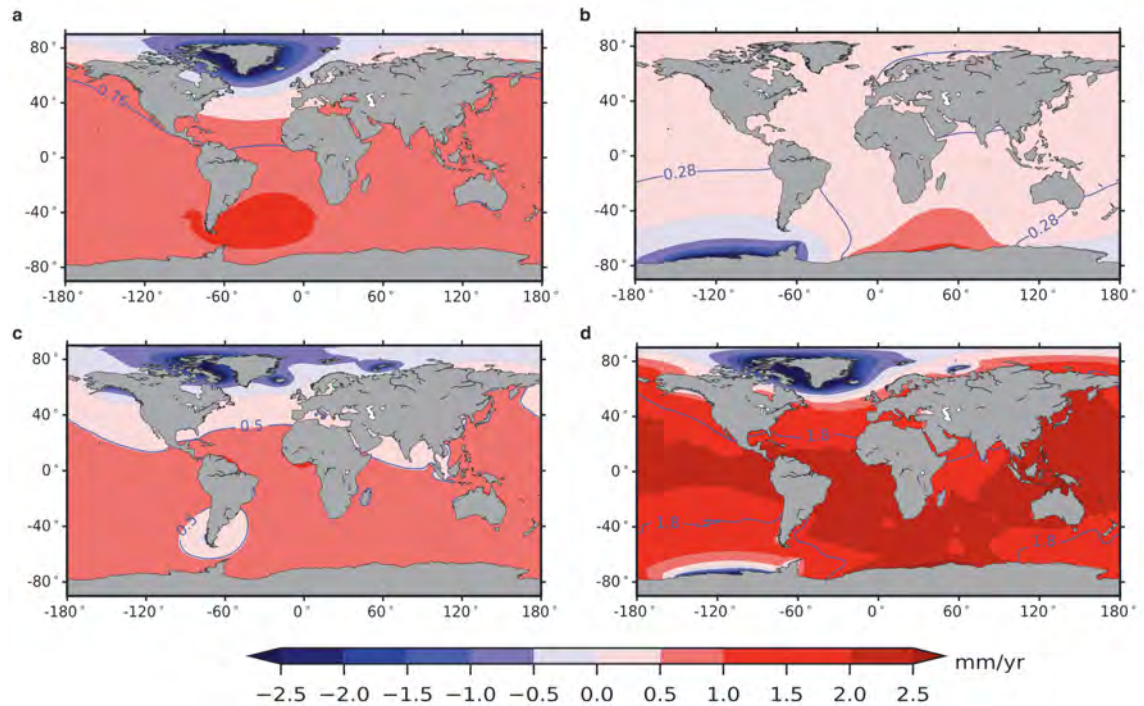
### 2.3.1 Gravitatie

In de jaren 70 van de vorige eeuw ontstond het inzicht dat de stijgende zeespiegel na afkalving of smelting zich niet uniform verdeelt over de wereld ([Clark and Lingle, 1977](#)), door wat we zelfgravitatie noemen. Het concept van zelfgravitatie is in de astronomie al langer in gebruik (zie bijvoorbeeld [Chamberlin and Moulton, 1909](#)). In de eerste zeespiegelprojecties werd dit fenomeen al meegenomen ([Mercer, 1978](#)). Daarna is het in de vergetelheid geraakt. In de laatste klimaatscenario's is het, in de ontwikkeling naar beter regionaal toepasbare scenario's, weer meegenomen ([Slangen et al., 2012](#); [Van den Hurk et al., 2014](#)).

Tegenwoordig staat dit fenomeen te boek als een onderdeel van de 'sea-level fingerprints' ([Clark et al., 2002](#)), zeespiegelvingerafdrukken. Het idee hierachter is dat de herverdeling van massa volgens een per ijsmassa vast te stellen vingerafdruk plaats vindt. Vlakbij de bron vindt zeespiegel daling plaats, iets verder weg een lagere dan gemiddelde zeespiegelstijging. Nog verder weg is de zeespiegelstijging hoger dan gemiddeld. Op sommige plekken is, door de rotatie van de aarde, de zeespiegelstijging weer lager dan gemiddeld.



Recent zijn voor het eerst kaarten gemaakt die het geobserveerde effect van de herverdeling van het huidig smeltende ijs laten zien (Hsu and Velicogna, 2017). Dit is weergegeven in fig. 2.7. Hierin is te zien 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 0.9mm/jaar zorgt aan de Nederlandse kust terwijl het globaal gemiddeld 1.8mm/jaar is. Het meest ongunstig liggen Ivoorkust, Indonesië en Papoea-Nieuw-Guinea en de Noordkust van Australië



*Figuur 2.7: Trends (over de periode april 2002 tot oktober 2014), berekend vanuit Sea Level Fingerprint (SLF) uit (a) Groenland, (b) Antarctica, (c) ijskappen en gletsjers en (d) de som van a–c (inclusief correcties). De blauwe lijn geeft aan waar de stijging evenredig is met de smelting, licht rode en blauwe vlakken liggen gunstig, donker rode vlakken hebben te maken met meer zeespiegelstijging. Uit Hsu and Velicogna (2017).*

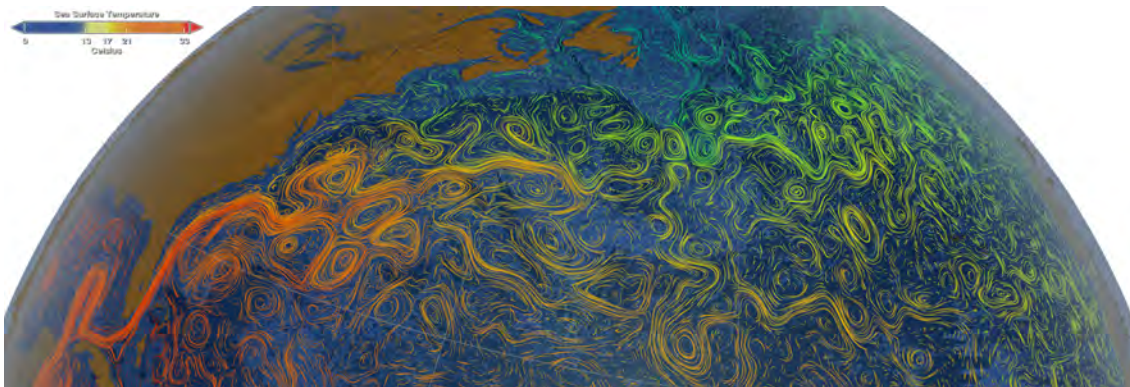
Deze onderverdeling komt grotendeels overeen met de verwachte vingerafdrukken (zie bijvoorbeeld voor de Wadden Vermeersen *et al.*, 2018). Voor Nederland geldt dat we nagenoeg geen zeespiegelstijging verwachten van het afsmelten van Groenland. Dat we slechts ongeveer 60% van de zeespiegelstijging van afsmeltende gletsjers aan de Nederlandse kust verwachten en 95%, net iets minder dan een evenredig deel, van het afsmelten van Antarctica. Nederland ligt daarmee, na de Scandinavische landen die ook nog bodemrijzing ondervinden van de laatste ijstijd, op een van de de meest gunstige plekken ter wereld. Als Antarctica veel verder afsmelt liggen vooral zuid Argentinië en Chili gunstig.

### 2.3.2 Circulaties

De zeespiegel kan ook beïnvloed worden door oceaancirculaties. Door verschillen in temperatuur, saliniteit, het corioliseffect en de kracht van de wind op het oppervlak van de oceaan ontstaan er oceaancirculaties, weergegeven in fig. 2.8.

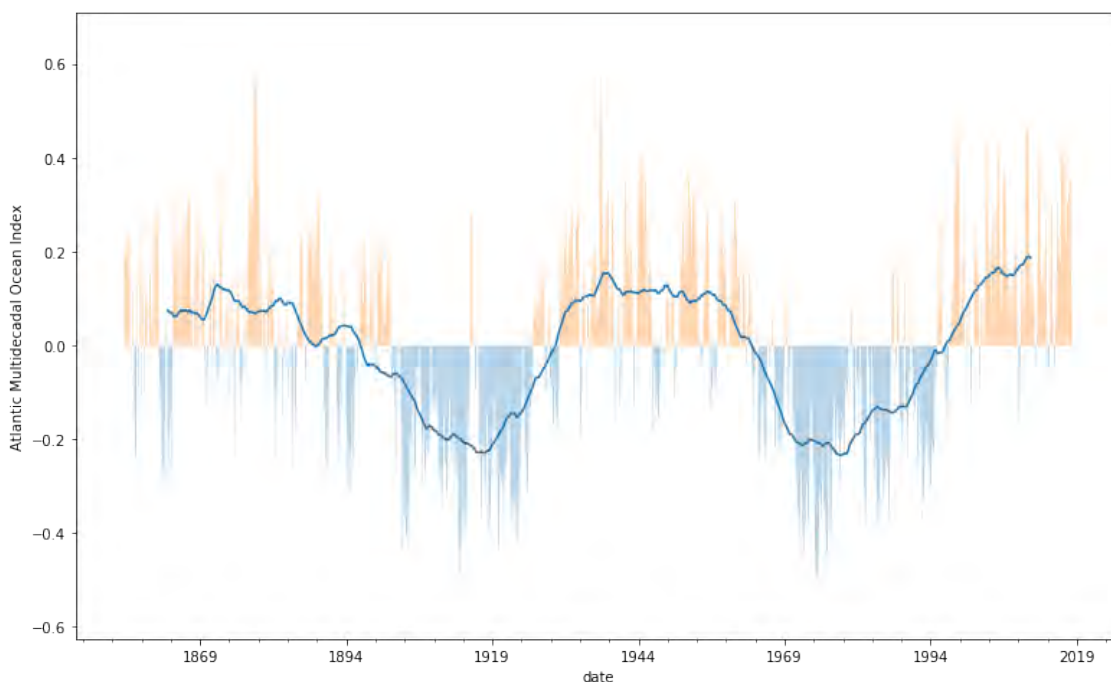
Een van de variaties in de circulatie wordt aangemerkt als de Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) (Schlesinger and Ramankutty, 1994). Deze oscillatie is gedefinieerd als de multidecadale





*Figuur 2.8: De golfstroom voert warm water van de Golf van Mexico naar West Europa, op basis van het Estimating the Circulation and Climate of the Ocean (ECCO) 2 model, visualisatie NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio.*

variatie in de temperatuur van de Noord Atlantische Oceaan. Op dit moment is de [AMO](#) index hoger dan gemiddeld fig. 2.9. De temperatuur van de Noord Atlantische Oceaan is dus nu hoger dan gemiddeld ([McCarthy et al., 2015](#)). Deze circulaties zorgen niet rechtstreeks voor een hogere zeespiegel. Ze kunnen wel zorgen voor meer of minder stormen en een ander golfklimaat. Er zijn aanwijzingen dat we overgaan naar een negatieve [AMO](#) ([Smeed et al., 2014](#)). Een lokale variant van een circulatie is de Region Of Freshwater Influence ([ROFI](#)) ([De Boer, 2009](#)), de zoetwaterpluim uit de Rijn die de stroming rond het zuidelijk deel van de Hollandse kust beïnvloedt.



*Figuur 2.9: Atlantische Multidecadale Oscillatie, een hoge waarde hangt samen met een warme Noord Atlantische Oceaan, data: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).*

### 2.3.3 Luchtdruk

Als er ruimtelijk luchtdruk verschillen ontstaan, dan stijgt de zeespiegel op de plek met de laagste luchtdruk. Een daling van 1 mbar komt ongeveer overeen met een stijging van 1 cm. Een gebied met hoge luchtdruk drukt het zeeoppervlak naar beneden (Dickman, 1988).

Door dit effect kunnen regionale veranderingen in luchtdruk zorgen voor een stijging of daling van de zeespiegel. Dit effect vindt plaats tijdens een storm waar een gebied met lage luchtdruk voor extra stormopzet zorgt. Er kunnen ook variaties over langere termijn optreden. Een bekend fenomeen is de North Atlantic Oscillation (NAO). Bij een hoge NAO, wat overeenkomt met een lage atmosferische druk, staat de zeespiegel op de Noord Atlantische Oceaan wat hoger.

### 2.3.4 Getij

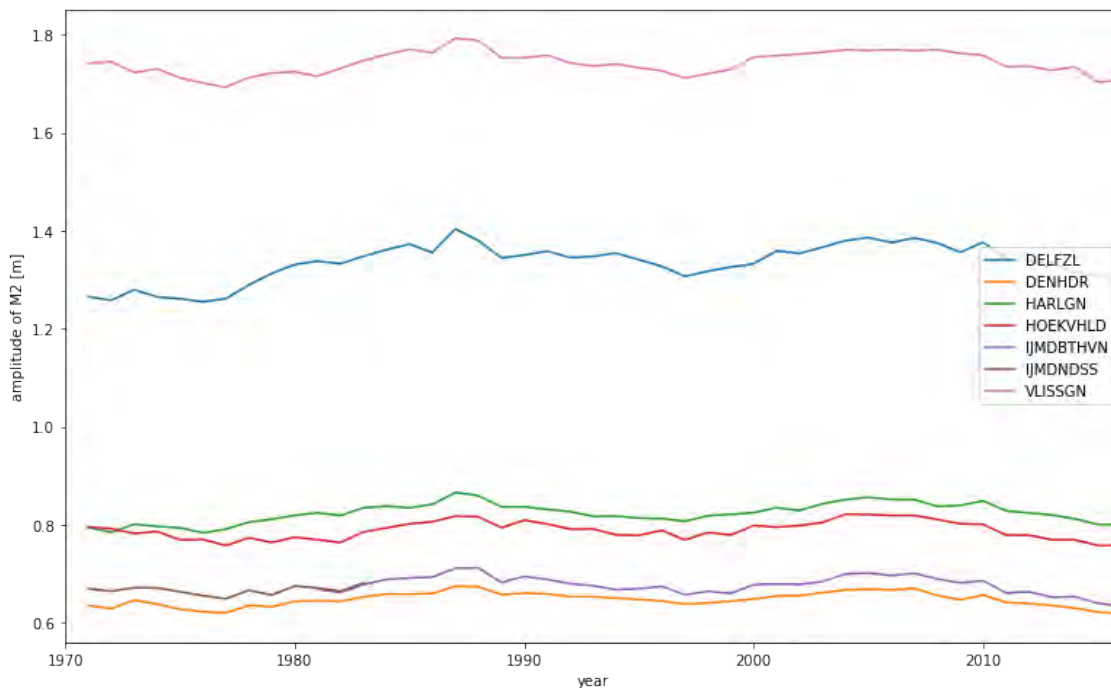
Het zeeoppervlak varieert door veranderingen van de aantrekkingskracht veroorzaakt door verandering van de posities van de aarde, de maan en de zon. Dit resulteert in zes verschillende frequenties tabel 2.1 die samengesteld tot een variabele waterstand leiden, het getij. Deze frequenties beïnvloeden de waterstand in verschillende boventonen (dubbeldaags getij) en modulaties (spring-doodtij cyclus). In de context van klimaatcycli kent men nog drie langere periodes, bekend als de Milankovich termen (Munk *et al.*, 2002).

Frequentie (deg /h)	Periode	Bron
14.49205211	1 dag	aarde draait rond
0.54901653	1 maand	maan draait om de aarde
0.04106864	1 jaar	scheve aarde draait om zon
0.00464184	8.85 jaar	afstand van aarde tot maan varieert
0.00220641	18.613 jaar	baan maan om aarde kantelt ten opzichte van baan aarde om zon
0.00000196	20940 jaar	afstand van aarde tot zon varieert

Tabel 2.1: Frequenties van het getij (Doodson, 1921).

De getijamplitude varieert langs de kust fig. 2.10. De amplitude kan veranderen door geometrische veranderingen aan de kust, zoals bij de aanleg van de Maasvlakte 2 en bij de aanleg van de Afsluitdijk. Het getij in Nederland kan ook veranderen door zeespiegelstijging (Pickering *et al.*, 2017) of geometrische veranderingen elders op de wereld.

De belangrijkste getijcomponenten, bijvoorbeeld bij Hoek van Holland: M2, M4, S2, O1, N2, MS4, MU2, L2, MN4, K1, hebben frequenties in de orde van dagen en maanden, welke in de jaargemiddelde zeestanden zijn uitgemiddeld. Van de langjarige getijcomponenten heeft vooral de nodale cyclus van 18.613 jaar een effect op de gemiddelde zeespiegel. Er is discussie over hoe het nodaal getij de zeespiegel precies beïnvloedt (bijvoorbeeld Hansen *et al.*, 2016) omdat de manifestatie van het getij in metingen niet altijd overeenkomt met de theorie.



Figuur 2.10: Amplitude van M2 voor de verschillende getijstations. Het station van IJmuiden is verplaatst van Noordersluis (donar code: IJMDNDSS) naar Buitenhaven (IJMDBTHVN), deze curves sluiten op elkaar aan (bruin en paars).

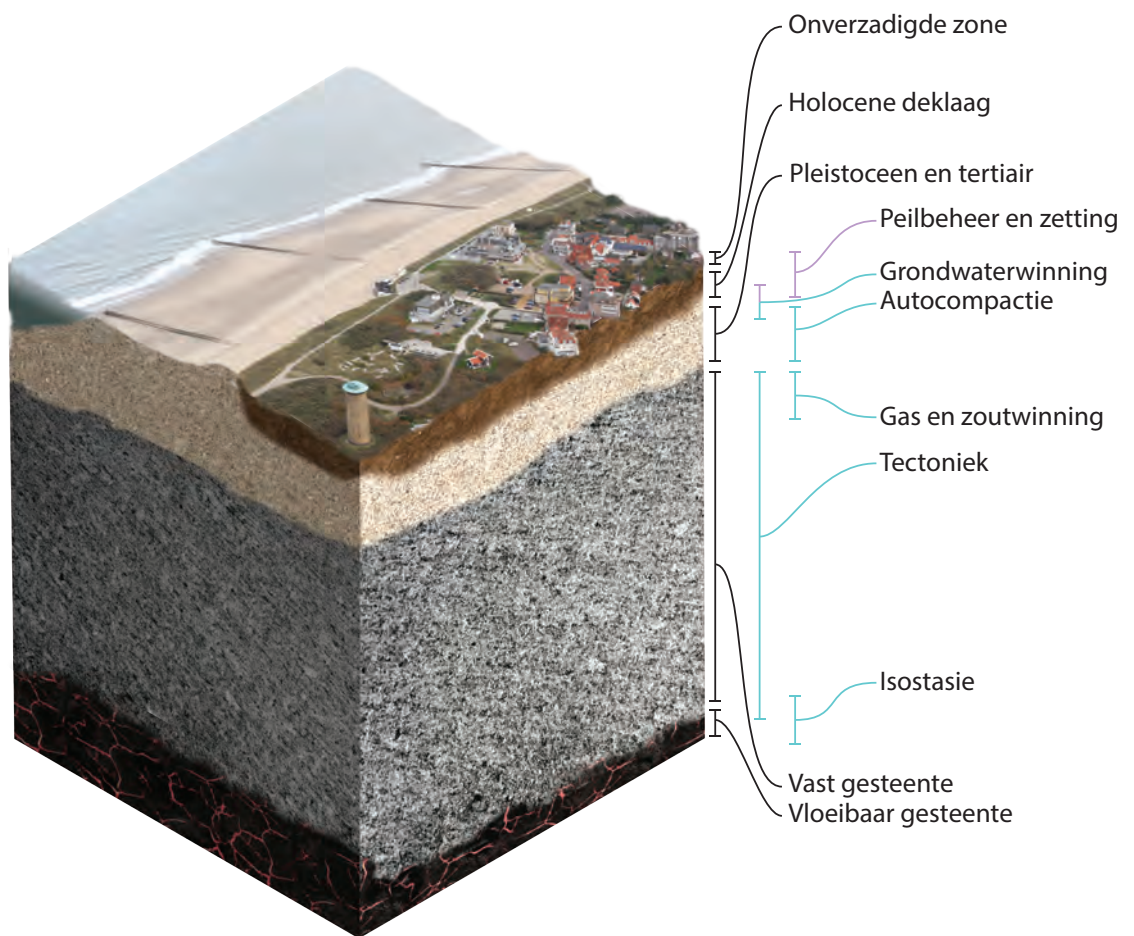
### 2.3.5 Bodemdaling

Al sinds we begonnen zijn met waterstandsmetingen is de vraag welk deel van de veranderingen bodemdaling en welk deel van de veranderingen absolute zeespiegelstijging is. Om de vraag te beantwoorden moeten we weten welke daling heeft plaatsgevonden in de verschillende lagen van de bodem en ten opzichte van welke bodemlaag we de zeespiegel meten. De eerste vraag wordt in deze sectie beantwoord. De tweede vraag in [paragraaf 4.2.1](#).

Tegenwoordig maken we onderscheid tussen de termen ‘absolute zeespiegelstijging’ en de term ‘relatieve zeespiegelstijging’. Met absolute zeespiegelstijging bedoelen we de zeespiegelstijging ten opzichte van de geïde. Met relatieve zeespiegel bedoelen we de combinatie van absolute zeespiegelstijging en absolute bodemdaling. Het is net zo logisch, en vroeger ook gebruikelijk ([Van Veen, 1945](#), zie bijvoorbeeld), om dit relatieve bodemdaling te noemen. Zowel de zakking van de bodem als de stijging van de zeespiegel hebben hetzelfde effect, dat het land ten opzichte van de zeespiegel daalt. In slechts 12% van de delta's is absolute zeespiegelstijging het grootste probleem. Het afknippen van de sediment toevoer is in de meeste delta's een groter probleem ([Ericson et al., 2006](#)). In verstedelijkte delta's is het winnen van gas en water onder de eigen bodem een veel voorkomende oorzaak van de relatieve zeespiegelstijging (zie bijvoorbeeld [Abidin et al., 2011](#)).

In deze sectie, uitgewerkt op basis van ([Hijma and Kooi, 2017, 2018](#)), onderscheiden we verschillende processen die voor bodemdaling kunnen zorgen, zoals weergegeven in tabel 2.2. Deze zijn visueel weergegeven in fig. 2.11.

De invloed van autocompactie en tektoniek, langs de Nederlandse kust, worden door [Hijma and Kooi \(2017\)](#) geschat op minder dan 0.1mm/jaar. De bijdrage van isostasie is groter in Noord Nederland (0.3 mm/jaar tot 0.7 mm/jaar) dan in Zuid Nederland (0.2 mm/jaar tot 0.5 mm/jaar),



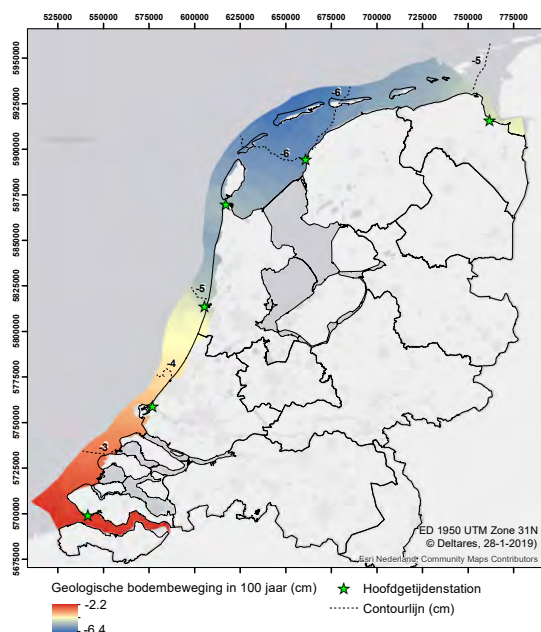
*Figuur 2.11: Lagen van de bodem en oorzaken van bodemdaling aan de Nederlandse kust. Blauwe oorzaken zitten in de relatieve zeespiegelstijgingsmetingen. De paarse oorzaken niet.*

Tabel 2.2: Oorzaken van bodemdaling, naar (Hijma and Kooi, 2017).

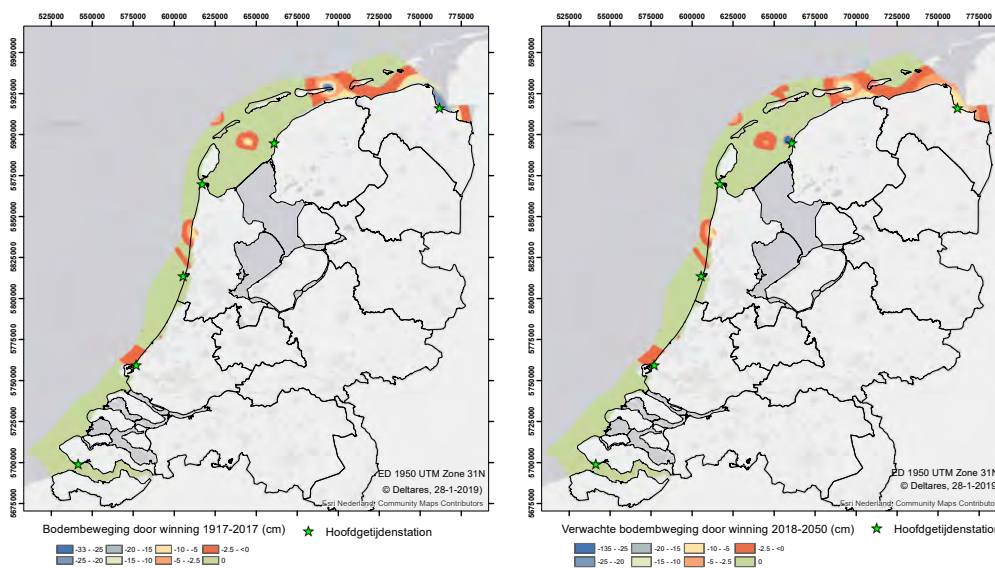
Oorzaak	Component	Mechanisme
Geologisch	Tektoniek	Spanningen in de ca. 100 km dikke Euraziatische aardplaat waar Nederland deel van uitmaakt. de Afrikaanse en Euraziatische aardplaat bewegen naar elkaar toe. Europa en Noord Amerika drijven van elkaar.
	Isostasie	Het terugbuigen van de noord-west Europese plaat door het afsmelten van de grote ijskappen die in de laatste glaciële periode op Groot- Brittannië en Scandinavië rusten.
	Autocompactie	Samendrukking van afzettingen tussen het maaiveld en honderden meters diepte. Deze compactie vindt plaats onder het eigen gewicht en door toename van dat gewicht in het recente geologische verleden door jonge afzettingen.
Antropogeen	Olie-/gaswinning	De drukverlaging in olie- of gasvelden zorgt voor samendrukking van de betreffende lagen.
	Zoutwinning	Lage druk in de cavernes die ontstaan door het winnen van zout. De cavernes worden langzaam dichtgedrukt en zorgen voor inzakking van bovenliggende lagen.
	Winning van grondwater	Waterdrukverlaging in de bodemlagen in de omgeving van de winning. De laag waaruit wordt gewonnen, maar ook boven en/of onderliggende lagen, worden samengedrukt.
	Peilbeheer	Periodische verlaging van het waterpeil in veengebieden. Hierdoor kan zuurstof het veen dat boven de grondwaterspiegel ligt oxideren (verbranden). Peilverlaging zorgt ook voor een waterdrukverlaging in klei- en veenlagen onder de grondwaterspiegel die daardoor iets worden samengedrukt.
	Zetting	Extra gewicht dat op het maaiveld (of waterbodem) wordt aangebracht drukt de lagen in de ondergrond worden samen.



zoals te zien in fig. 2.12. De gevolgen van zout en gaswinning staan weergegeven in fig. 2.13. Tot nu toe zijn het vooral de gaswinningen die voor een aanzienlijke bodemdaling hebben gezorgd.



Figuur 2.12: Bodemdaling door tektoniek en isostasie, uit (Hijma and Kooi, 2018).



Figuur 2.13: Bodemdaling door winningen (verleden, verwacht), uit (Hijma and Kooi, 2018).

Een andere manier om de bodemdaling te bepalen is om de zeespiegel zowel relatief als absoluut te bepalen. Dit wordt gedaan door de getijstations met Global Navigation Satellite System (GNSS) apparatuur uit te rusten. Hiermee kan de verandering ten opzichte van de peilbout bepaald worden, maar ook ten opzichte van de geïde. De hoofdstations van IJmuiden en Vlissingen stations zijn nu uitgerust met GNSS. In de buurt van Hoek van Holland en Delfzijl zijn GNSS stations geplaatst. De eerste resultaten van de uitgebreide analyse van deze gegevens worden volgend jaar verwacht. De gegevens zijn ook opgenomen in internationale datasets. Het kadaster zal de gegevens in September 2019 als open data beschikbaar maken.



Naast het vaststellen van de bodemdaling voor de verschillende lagen in de bodem is het ook nodig om te bepalen ten opzichte waarvan we meten. Dit wordt uitgebreid beschreven in sectie 4.2.1.

Sinds 1958 meten de zeespiegelstijging ten opzichte van de diepte van de nulpalen. Hoe diep de nulpalen zijn gefundeerd staat beschreven in het overzicht van de hoofdstations in sectie 4.1. Simpel samengevat zeggen we doorgaans dat ze gefundeerd zijn op het Pleistoceen. Voor 1958 zullen de merken minder diep zijn gefundeerd en deels in het Holoceen (van de ijstijd tot nu) gefundeerd zijn. In de periode 1890-1958 zal dus ook nog een deel van bodemdaling van de Holocene afzettingen zitten. Een overzicht van de bodemdalingscomponenten per station staan in tabel 6.3.

Nu we bepaald hebben welke bodemdalingprocessen plaatsvinden in de verschillende lagen en ten opzichte van welke diepte we hebben gemeten kunnen we vaststellen welke bodemdalingscomponent in de relatieve zeespiegelstijging zit. We gaan er van uit dat de tektonische bodembeweging, de isostatische bodembeweging en, met uitzondering van Delfzijl, de bodembeweging door winningen onderdeel uitmaken van de relatieve zeespiegelstijging zoals deze langs de Nederlandse kust wordt gemeten.

### 3 Toepassingen

Dit hoofdstuk is een update en ingekorte versie van het rapport [Zeespiegelmonitor: Eenduidige zeespiegelindicatoren](#) in de bijlage.

Traditioneel worden de waterstandsmetingen vooral toegepast in de scheepvaart. Met name de tijdstippen van het getij zijn belangrijk om te bepalen of er genoeg ruimte onder de kiel (laagwater) en onder een brug (hoogwater) is. Sinds het begin van de 20e eeuw ontstond het idee dat de zeespiegel al lange tijd aan het stijgen is. Daardoor werd het steeds belangrijker om ook naar de gemiddelde zeespiegel te kijken [Van Veen \(1945, 1954\)](#).

In dit hoofdstuk bespreken we een aantal toepassingen waar de stand van de zeespiegel, nu ten opzichte van vroeger, of in de toekomst ten opzichte van nu, gebruikt worden. In November 2016 is een expert sessie belegd voor gebruikers van zeespiegelindicatoren. Hierbij is gekeken naar het gebruik van zeespiegelindicatoren voor diverse toepassingen. Op basis van dat overzicht is onderstaand overzicht gemaakt van enkele toepassingen waarbij indicatoren van de zeespiegel gebruikt worden. Per toepassing wordt een overzicht gegeven van de volgende aspecten.

**Definitie** de wijze waarop het is opgeschreven en de interpretatie

**Grootheid** hoogwater, laagwater, gemiddelde waterstand

**Categorie** beheer en onderhoud, beoordeling van veiligheid, ontwerp of planvorming (ruimtelijke ordening)

**Toepassing** waar wordt de indicator voor gebruikt

**Oorsprong** waar komt de indicator voor het eerst voor, in beleidsstukken, uitgangsdocumenten en wetten

**Producent** organisatie die verantwoordelijk is voor het vaststellen van de indicator

**Gebruiker** organisatie die het beleid uitvoert waarop het getal is gebaseerd

**Verantwoording** hoe het getal tot stand is gekomen, referentie naar het document waarin dit is beschreven.

#### 3.1 Kustbeheer

Zoals in de [Inleiding](#) besproken heeft de overheid zich als taak gesteld om de kustlijn en het kustfundament dynamisch te handhaven. In het kader van de vergelijking werken we hier de verschillende aspecten verder uit.

Het handhaven gebeurt in de vorm van zandsuppleties. Het beleidsuitgangspunt is dat geen structurele erosie van de kustlijn plaatsvindt en dat het kustfundament meegroeit met de zeespiegel. Beide doelen zijn sinds de 3e Kustnota (RWS, 2000) herhaald in diverse stukken (Nota Ruimte, 2004; Integraal Beheerplan Noordzee, 2007; Nationaal Waterplan 2009-2015 en 2016-2021; Nationaal Kader Kust, 2011; Nationale Visie Kust, 2013; Beslissing Zand, 2014; Suppletieprogramma Kustlijnzorg; 2015). Het benodigde zandvolume om mee te groeien wordt voor een belangrijk deel bepaald als het product van 'het oppervlak van het kustfundament' en 'de

actuele zeespiegelstijging'. De trend in de actuele zeespiegelstijging is dus de indicator die voor het beheer en onderhoud van de kust wordt gebruikt.

Sinds 2001 wordt jaarlijks gemiddeld 12 Mm<sup>3</sup> zand gesuppleerd langs de Nederlandse kust. Dit is de richtwaarde uit de 3e Kustnota die in de uitvoering van het beleid in het programma Kustlijn­zorg is overgenomen. Directoraat-generaal (DG) Water en Bodem neemt op basis van het be­leidsadvies in 2020 en op basis van inzichten uit het programma Kustgenese 2.0 een beslissing over het benodigde suppletievolume voor de jaren daarna. Kustfundament, zeespiegelstijging en suppletievolume zijn direct gekoppeld aan elkaar. De basis voor het huidige suppletievolume is een rapport uit het jaar 2000. Mulder (2000) stelt dat de totale suppletie­behoefte bij gelijkblij­vende trend in de zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw wordt geschat op gemiddeld 12 Mm<sup>3</sup> per jaar (met een maximum van 16 miljoen Mm<sup>3</sup> per jaar). In het geschatte volume is niet alleen rekening gehouden met zandverlies van het kustfundament, maar ook dat van de Waddenzee en de Westerschelde. Basisuitgangspunt bij de bepaling van het suppletievolume is de aanname dat de sedimentvraag van de kust op lange termijn bepaald wordt door het oppervlak van het zanddelende kustsysteem.

**Naam** Huidige zeespiegelstijging

**Definitie** De langjarige trend in de jaargemiddelde zeespiegel voor de zes hoofdstations.

**Grootheid** Waterstand ten opzichte van [NAP](#)

**Toepassing** Beheer en onderhoud Kust

**Oorsprong** 3e Kustnota (2000)

**Producent** Deltares

**Gebruiker** Rijkswaterstaat, programma Kustlijn­zorg, programma Kustgenese

**Literatuur** Mulder (2000), ([Dillingh et al., 2010](#)), ([De Ronde et al., 2014](#)), ([Baart et al., 2015a](#))

### 3.2 Delfstoffenwinning

Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat ([EZK](#)) heeft in 2015 Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek ([TNO](#)) verzocht advies uit te brengen over het voor de delfstoffenwinning onder de Waddenzee met ingang van 2016 te hanteren be­leids­scenario voor de zeespiegelstijging. Het gaat hier om gaswinningen die worden toegestaan voor een duur van enkele tientallen jaren, waarbij tussentijds ingrijpen mogelijk is, als dit nodig zou blijken te zijn. De ruimte voor winning wordt mede bepaald door de snelheid van de zeespiegel­stijging. Het betreffende beleidsscenario wordt elke 5 jaar geactualiseerd op basis van recente inzichten.

Het [TNO](#) heeft dit uitgewerkt in een advies ([Kroon, 2016](#)) om rekening te houden met zowel een trend als een versnelling in de relatieve zeespiegelstijging. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat ([EZK](#)) hanteert bij haar besluitvorming een gebruiksruimte (meegroeivermogen minus het deel hiervan dat dient ter compensatie van de stijgende zeespiegel) van 5mm/jaar.

**Naam** Beleidsscenario zeespiegelstijging

**Definitie** Geobserveerde zeespiegelstijging van de stations in het Nederlandse deel van de Wadden plus een versnelling op basis van de wereldwijde acceleratie.

**Grootheid** Stijging van de zeespiegel

**Toepassing** Hand aan de kraan

**Oorsprong** Mijnbouwwet, Natura2000

**Producent** TNO

**Gebruiker** Ministerie van Economische Zaken

**Literatuur** Kroon (2016)

### 3.3 Ontwerp

Een voorbeeld van een ontwerp indicator zien we bij de aanleg van de zeewering van Maasvlakte 2, begin deze eeuw. Het midden scenario uit de 3e Kustnota is gebruikt in combinatie met een levensduur van 50 jaar. In het noordwesten van Maasvlakte 2, waar schepen via de vaargeul de haven van Rotterdam binnenlopen en de ruimte voor een zeewering dus beperkt is, beschermt een harde zeewering het nieuwe havengebied. De harde zeewering van Maasvlakte 2 heeft een kruinhoogte van circa 14 m+NAP. De zeewering is ontworpen op omstandigheden die statistisch gezien gemiddeld eens in de 10,000 jaar voorkomen. Hierbij is rekening gehouden met een stijging van de zeespiegel voor de komende vijftig jaar van 0.30m, wat overeenkomt met het midden scenario uit de 3e Kustnota. Voor de opvolgende periode van 50 jaar is er ruimte gereserveerd om de kruin van de zeewering nog eens met 0.50m te verhogen. Het is dus een adaptief ontwerp. De Maasvlakte 2 ligt op 5 m boven NAP achter de zeewering.

Adaptief ontwerpen is niet nieuw. Ook bij bijvoorbeeld de Oosterscheldekering is rekening gehouden dat de bovenkant vervangen moet kunnen worden. Voor de basis is wel gekozen voor een verwachte levensduur van 200 jaar. Dit sluit ook aan bij adviezen van de eerste Delta Commissie (ontwerpen voor een fractie van een eeuw) (Deltacommissie, 1960).

Naast harde en zachte keringen zijn er ook nog de niet-vervangbare kunstwerken, die niet of nauwelijks aan te passen zijn, zoals bijvoorbeeld de Maeslantkering. Voor dergelijke kunstwerken wordt met de bovengrens van het Veerman-scenario gerekend (Deltacommissie, 2008). Bij het ontwerp van de zeesluis IJmuiden, met als zichtjaar 2120, is hier gebruik van gemaakt (RWS, 2014). Zo is uitgegaan van een zeespiegelstijging van 1.20m in 2100 ten opzichte van 2000. Voor de jaren na 2100 wordt lineair geëxtrapoleerd.

**Naam** Ontwerphoogte Maasvlakte 2

**Definitie** Hoogwaterstand (inclusief golven) met een overschrijdingsfrequentie van  $10^{-4}$ 1/jaar plus een scenario van zeespiegelstijging 50 jaar vooruit.

**Grootheid** Hoogwaterstand

**Categorie** Ontwerp

**Toepassing** Ontwerphoogte/levensduur

**Oorsprong** Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 (1998)

**Producent** Deltares (hoogwaterstand) + KNMI (scenario's)

**Gebruiker** Haven van Rotterdam

**Literatuur** [Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 \(1998\)](#)

### 3.4 Toetsing/beoordeling

In Wettelijke BeoordelingsInstrumentarium (WBI) ([Infrastructuur en Milieu, 2016](#)) zijn de toeslagen voor getijhoogwaterstijging (omschreven als “zeespiegelrijzing en lokale effecten”) bepaald voor de periode 1985-2023 op basis van een statistische analyse van tijdreeksen van hoogwaterstanden tot en met 2012 voor 23 stations. Aanname hierbij is dat de gemiddelde trend (in de stijging) tussen 1985 en 2012 zich voortzet tot 2023. De gemiddelde toeslagen langs de Nederlandse kust, Westerschelde en Waddenzee zijn voor de periode 1985-2023 gelijk aan de toeslagen voor de periode 1985-2017 (met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid).

**Naam** Toeslag getijhoogwaterstijging

**Definitie** Regionaal variërende toeslag getijhoogwaterstijging in 2011 ten opzichte van 1985

**Grootheid** Hoogwater

**Categorie** Toetsing

**Toepassing** Wettelijke beoordeling veiligheid primaire waterkeringen

**Oorsprong** Hydraulische Randvoorwaarden (HR2006)

**Producent** Deltares

**Gebruiker** Rijkswaterstaat, Waterschappen

**Verantwoording** Derde toetsronde: achtergrondrapportages HR2006, documenten Douwe Dillingh (teruggaand tot vaststelling basispeilen in 1985) WBI2017: Chbab (2015)

### 3.5 Percentage onder zeeniveau

In ruimtelijke-ordeningsvraagstukken speelt de vraag waar we kunnen wonen, bouwen en verbouwen. Vaak wordt Nederland geprezen omdat we ons in staat hebben gesteld om te kunnen wonen onder de zeespiegel (bijv. OECD 2014). De bijbehorende indicator die in gebruik is, is het “% van Nederland dat onder zeeniveau ligt”, soms wordt gebruikt “het percentage van de bevolking dat onder de zeespiegel woont”. Meestal wordt gesteld dat meer dan de helft van Nederland onder zeespiegel ligt (bijv. RWS 2016, Koenders 2015, OECD 2014). Dit percentage is al geruime tijd in gebruik (bijvoorbeeld Prillewitz 1966). Dit percentage bleek niet correct toen het in het IPCC (2007) rapport terecht kwam en dit rapport grondig werd gecontroleerd (Vrij Nederland 2010). Het PBL, die de bijdrage had geleverd aan de IPCC, schreef een correctie ([Author, 2010](#)). Hierin gaven ze aan dat het percentage van Nederland onder zeespiegel niet 55% maar 26% had moeten zijn. Dit is eigenlijk ook niet het percentage onder zeeniveau, maar onder [NAP](#).

Wat misschien wel de belangrijkste conclusie van deze indicator is is dat afgezien van het gebruik in internationale profilering de indicator niet tot daadwerkelijke actie leidt. De indicator heeft

vooral een symbolische en representatieve waarde. Zeker vanwege dat laatste is het wel belangrijk dat het cijfer correct en goed gedefinieerd is, nemen we deze indicator voortaan op in deze rapportage, in dit geval in sectie 7.3.

**Naam** Percentage Nederland onder zeeniveau

**Definitie** Onbepaald

**Grootheid** Topografie > zeeniveau

**Type** Planvorming

**Toepassing** Toespraken en inleiding wetenschappelijke artikelen

**Oorsprong** Onbekend

**Context** Dit cijfer wordt in veel toespraken gebruikt, bijvoorbeeld (Rutte, 2016).

**Producent** Onbekend, correctie door Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)

**Gebruiker** Ministers, wetenschappers, Rijkswaterstaat

**Verantwoording** Er is geen publicatie waar het getal wordt uitgerekend. Er is geen methode beschreven.

### 3.6 Zeespiegel over 200 jaar

In de 3e Kustnota is gedefinieerd dat extra ruimte moet worden gereserveerd voor uitbreiding van de kustbescherming. Het gaat hier om het opnemen van een reservestrook (een planologische reservering) voor 200 jaar zeespiegelstijging in de leggers van waterschappen. Hierbij wordt uitgegaan van een pessimistisch scenario: 85 cm/eeuw zeespiegelstijging en 10% toename wind. De waterschappen houden op die manier rekening met ruimte om de gevolgen van zeespiegelstijging op te vangen. Dit kan bijvoorbeeld door de waterkering te verbreden. De 3e Kustnota stelt verder strenge voorwaarden aan bebouwing langs de kust. Zo moet rekening worden gehouden met de planologische reservering, zijn harde elementen in de afslagzone en reserveringsstrook die het wezen van de flexibele kust aantasten niet toegestaan en mag nieuwe bebouwing geen belemmering vormen voor het proces van afslag. Dit is onlangs nog eens bekrachtigd in het voorlopige Kustpact. De waterschappen hebben het begrip reserveringszone (ook wel vrijwaringszone genoemd) hernoemd naar "profiel van vrije ruimte" en gesteld dat het het deel van de zone is dat "naar het oordeel van de beheerder nodig is voor toekomstige verbeteringen". Hierbij is expliciet de definitie van de zeespiegelstijging losgelaten (Unie van Waterschappen, 2013). Waterschappen leggen in de Keur en in de Legger vast wat de specifieke invulling is.

Voor een voorbeeld van de implementatie hiervan beschouwen we de beschermingszones bij Callantsoog in Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). Er zijn twee beschermingszones A en B. Beschermingszone A ligt naast de primaire kering (zie fig. 3.1).






**Naam** Zeespiegel over 200 jaar

**Definitie** Zeespiegel uit scenario maal twee + 10% wind. Gecombineerd met Morphological Analysis (MorphAn) berekening.

**Toepassing** Bepaling keur en legger



Hieronder staan de legenda's van de zichtbare kaartlagen.

-  Waterkering
-  Waterstaatswerk
-  Beschermingszone
-  Beschermingszone B
-  Beschermingszone A

Figuur 3.1: Beschermingszones Callantsoog

**Oorsprong** (Author, 2012)

**Type** Planvorming

**Context** ECLI:NL:RBSGR:2006:AZ5796

**Instituut** Unie van Waterschappen (Keur/Legger), Deltares (MorphAn), KNMI scenario's

**Gebruiker** Waterschappen

**verantwoording** (Author, 2012)

### 3.7 Trends in toepassingen van de zeespiegel

Uit de workshop in november 2016 bleek dat er een aantal ontwikkelingen zijn in het gebruik van indicatoren. Zo werd besproken dat er meer adaptief wordt ontworpen en is degene die de waterkering / kunstwerk aanlegt ook verantwoordelijk voor het onderhoud.

Voorheen	Nu
Statische ontwerpen	Adaptieve en/of uitbreidbare ontwerpen
Langere ontwerpduur	Kortere ontwerpduur
B & O gescheiden van ontwerp	Design Build Finance and Maintain
Robuust ontwerp	Kosteneffectief ontwerp

Tabel 3.1: Trends in zeespiegel indicatoren

Op basis van de expertsessie en de uitwerking van de indicatoren blijkt dat indicatoren voor de middellange termijn ontbreken. Tot op het heden wordt binnen de onderzochte toepassingsgebieden met een korte zichtduur gerekend (5-10 jaar vooruit) of met een langere zichtduur (50-200

jaar vooruit). In het beheer en onderhoud gaat men momenteel toe naar ontwerpen waarbij men een beeld wil hebben van de ontwikkelingen op middellange termijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de Zandmotor waarbij men wil weten hoe die zich langs de Nederlandse kust gaat verplaatsen. In het ontwerp is er een trend zichtbaar naar ontwerpen met zichtjaren in de middellange termijn. Dit komt omdat de onzekerheden op lange termijn zo groot zijn dat een ontwerp voor een periode van 50 jaar in veel gevallen niet doelmatig is. Deze twee toepassingen groeien dus naar elkaar toe en dus ontstaat de behoefte aan eenduidige indicatoren op de middellange termijn. Het is wenselijk om korte, middellange en lange termijn indicatoren te hebben die op elkaar aansluiten.





## 4 Metingen

Er zijn twee manieren om de zeespiegel te meten. De relatieve zeespiegel aan de kust wordt gemeten met een vlotter of radar in een getijstation ten opzichte van een referentieniveau op het land en de absolute zeespiegel op de oceaan wordt gemeten met satellieten met een radar, ten opzichte van een spheroïde, geoïde of als anomaliteit. Dit hoofdstuk beschrijft deze twee meetbronnen.

### 4.1 Getijdestations

De eerste waterstandsmetingen aan de Nederlandse kust zijn gestart in het jaar 1700 in Amsterdam. Sinds de invoering van het [NAP](#) zijn de gegevens ook geschikt om zeespiegel trends mee te bepalen.

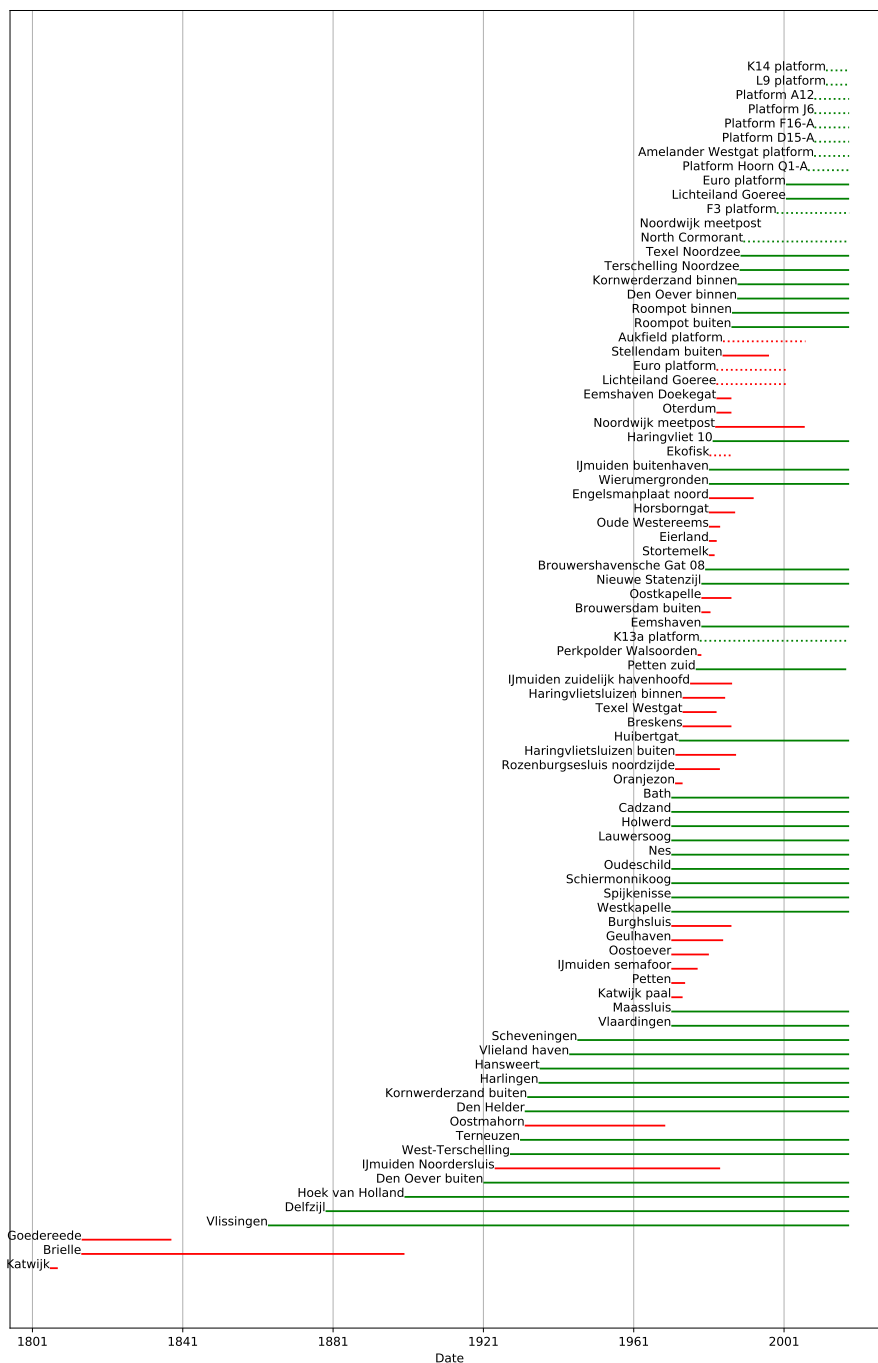
In Nederland zijn er 269 stations bekend die sinds 1890 de hoogte van de waterstand hebben gemeten. Van deze stations liggen er 69 aan de huidige kust en 16 in de Noordzee. Van deze stations zijn er verschillende stations in de loop der tijd verplaatst. Zo is het station van IJmuiden verplaatst van de Noordersluis, naar het havenhoofd en later naar de huidige locatie buiten de haven.

In fig. 4.1 is een overzicht van de beschikbare metingen van de kuststations. Niet alle gegevens zijn meer beschikbaar. Wel zijn nog oude jaar- en maandgemiddelden beschikbaar. Deze gegevens zijn gearchiveerd bij het internationale archief van de Permanent Service for Mean Sea Level ([PSMSL](#)). Daar zijn de gegevens beschikbaar van de volgende stations: Delfzijl, West-Terschelling, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland, Maassluis, Roompot Buiten, Vlissingen. Van deze stations worden er zes aangemerkt als “Hoofdstations”. Dit zijn zes stations, redelijk uniform verdeeld langs de Nederlandse kust, met een lange historie aan metingen. Dat zijn de stations (eerste jaargemiddelde) Delfzijl (1865), Harlingen (1865), Den Helder (1865), IJmuiden (1871), Hoek van Holland (1864), Vlissingen (1862). De jaargemiddelde gegevens gaan verder terug dan de beschikbare uur/ minuten waarden in fig. 4.1.

Deze stations maken deel uit van het [LMW](#). Dit systeem zorgt voor de inwinning, opslag en ontsluiting van de gegevens die de toestand van het water (standen, stroming, temperatuur, saliniteit) en het weer beschrijven.

Alle hoofdstations zijn uitgerust met twee vlotters. Er zijn ook enkele stations met andere sensoren, zoals radar. Soms kan een station een tijd niet beschikbaar zijn. Zo is het station van Den Helder wel eens uitgevallen door de groei van mosselen. De gegevens worden dan teruggeschat op basis van naburige stations (in dit geval Texel en IJmuiden). Dit wordt de opvulmethode genoemd. Daarnaast vinden er diverse validaties plaats. Zie de memo in de bijlage waar het meetproces uitgebreid beschreven wordt.

De bekende eigenschappen van de constructie van de stations worden in onderstaand overzicht weergegeven. Bij de stations van Hoek van Holland en Delfzijl heeft onder de stations gaswinning plaatsgevonden. De foto's zijn van Rijkswaterstaat.



Figuur 4.1: Overzicht van de beschikbare waterstandsmetingen van de stations die waterstanden meten langs de kust. Rood/groen: actief/niet actief, Stippel/doorgetrokken lijn: meting t.o.v. NAP (kust)/meting t.o.v. Mean Sea Level (MSL) (buitengaats)

#### 4.1.1 Vlissingen



*Meetstation Vlissingen*

Dit station ligt aan de kade in Vlissingen (51.44210°N, 3.59610°O), nabij de buitenhaven. Het fundament is een stalen damwand met een diepte van -17.6m NAP, en een breedte van 2.2m. Binnen deze damwand liggen de meetinstrumenten. De onderwater kamer is een afgesloten betonnen plaat die zich bevindt op -4.0m NAP tot -5.0m NAP. Het station heeft een [GNSS](#). Tijdens de storm van 1953 overstroomde de kade waarop het station staat. Hiervan zijn [filmbelden](#) beschikbaar.

#### 4.1.2 Hoek van Holland



*Meetstation Hoek van Holland*

Het station in Hoek van Holland ligt naast de Nieuwe Waterweg bij de monding van de rivier. De referentiepaal bevindt zich buiten het hoofdgebouw op het vaste land. Het hoofdgebouw is verbonden met het vaste land door een stalen brug. De basis van het hoofdgebouw ligt op stalen palen. Het gebouw is een betonconstructie met een diepte tot -3.0m NAP, hierin bevinden zich de meetinstrumenten. De peilkelder bevindt zich in het hoofdgebouw. De gehele betonconstructie heeft een fundering van meerdere damwanden. Dit zijn 8 betonnen platen (8-zijdig) met een lengte van 14.1 m. De nabijgelegen nulpaal van 28.35m is geplaatst op een diepte van 23.5m. Dit station is door gaswinning 2 centimeter verzakt ([Hijma and Kooi, 2018](#)) op basis van een schatting van de winningsschotel. Deze verzakking zit al in de metingen doordat het [NAP](#) peilmerk hier niet voor is gecorrigeerd, zoals bij Delfzijl wel het geval is. In de buurt van het station is een [GNSS](#) station geplaatst.

#### 4.1.3 IJmuiden



*Meetstation IJmuiden*

IJmuiden ligt aan de noordkant van de jachthaven in IJmuiden, in de buurt van een golfbreker. Het hoofdgebouw bevindt zich in het water en is verbonden door een stalen trap en een brug met het vaste land. De basis van dit gebouw bestaat uit een ronde stalen damwand. De onderwaterkamer wordt afgesloten met een betonplaat tussen -3.75m NAP en -4.5m NAP. De damwand wordt uitgebreid tot een diepte van -13m NAP. IJmuiden heeft [GNSS](#). De nulpaal staat op het vaste land. De metingen van IJmuiden omvatten ook de oudere metingen van locatie IJmuiden Noordersluis.

#### 4.1.4 Den Helder



*Meetstation Den Helder*

Dit station bevindt zich in de dijk van Den Helder. Het station heeft een pijp door de dijk naar de zee voor het meten van het waterniveau. De inlaat van deze pijp ligt op -3.25m NAP. Er is een aparte constructie voor de ventilatie van het hoofdgebouw. Het station is via een pijp door de dijk met zee verbonden en daar leggen mosselen eitjes in. Als die allemaal tegelijk groeien raakt de pijp verstopt en is het station buiten gebruik. De peilbout bevindt zich buiten het hoofdgebouw aan de overkant van de dijk. De hoofdconstructie heeft een basis van stalen damwanden die een rechthoek vormen rondom de meetinstrumenten. De nabijgelegen nulpaal van 17.5m staat op een diepte van 12.23m.

#### 4.1.5 Harlingen



Het getijstation in Harlingen bevindt zich in de haven op de boulevard. Op een diepte van -2.56m NAP loopt een pijp van het station naar zee. De inlaat van de buis wordt beschermd door een constructie, om de variaties door de golfinslag te verminderen. Het hoofdgebouw heeft een fundament van een stalen damwandconstructie met rechthoekige binnenafmetingen 2.53 x 2.27 m<sup>2</sup> rondom de meetinstrumenten. De 28m lange nulpaal staat op een diepte van 22m. In de buurt van dit station start zoutwinning.

Meetstation Harlingen

#### 4.1.6 Delfzijl

Dit station bevindt zich in de haven van Delfzijl. Het station heeft een hoofdgebouw met een fundament op een stalen ronde paal (binnenbreedte = 2.3m, buitenbreedte 2.348m) en reikt tot een diepte van -20m NAP. Het gebouw is verbonden met het vaste land door middel van een stalen trap naar een kade. De peilbout bevindt zich in de constructie die aan de muur is bevestigd. De betonnen onderwaterkamer bevindt zich tussen -4 en -5 m. Dit station is door gaswinning 24cm gezakt (Hijma and Kooi, 2018) en zakt nog steeds. De peilbouts zijn 'losgekoppeld' van het NAP (De Jong, 1973). De hoogtes van buiten de gaswinningschotel worden doorgetrokken naar Delfzijl. Om de relatieve zeespiegelstijging te berekenen moet daarom bij dit station de door gaswinning veroorzaakte bodemdaling opgeteld worden. In de buurt van het station Delfzijl is een GNSS station geplaatst.



Meetstation in Delfzijl

### 4.2 Verticale referentieniveaus

Een meting van hoogte heeft een verticale referentie nodig. Hiervoor wordt een geodetisch datum gebruikt. Er zijn verschillende referentiesystemen in gebruik, in de context van zeespiegelonderzoek heeft men te maken met globale, continentale (tectonische platen), nationale en maritieme referentieniveaus.

In Nederland wordt de hoogte nauwkeurig vastgesteld sinds de invoering van het NAP. Oorspronkelijk lag het NAP op het gemiddelde hoogwaterniveau in het IJ, van voor de afsluiting in 1872 (Van der Weele, 1971), 9 voet, 5 duim, Amsterdamse maat (2.68m) boven Stads Peyl. De Rijkscommissie Graadmeting voor Waterpassing (nu Nederlands Centrum voor Geodesie en Geoinformatica (NCG)) voerde de eerste serieuze waterpassingen uit, waarmee het invoeren van het NAP mogelijk werd. Rijkswaterstaat (Centrale Informatievoorziening (CIV)) is verantwoordelijk voor het beheer van het NAP, in samenwerking gedaan met het Kadaster.

Het NAP wordt gebruikt om Nederlandse zeespiegelmetingen aan de kust uit te drukken. Het is gebaseerd op de ruim 30 duizend peilmerken. Het is geldig binnen het domein waar de peilmerken zich bevinden. Op zee en voor satellietmetingen op de oceaan is het niet bruikbaar.



Figuur 4.2: Eerste waterpassing in 1880 met ir. C. Lely (witte hoed) naast het Camida waterpasinstrument.

Voor internationale uitwisseling van gegevens van getijstations wordt gebruik gemaakt van een Revised Local Reference (RLR). Voor Nederland wordt dit gebruikt om de NAP correctie door te voeren, zoals beschreven in Dillingh *et al.* (2010). Doordat een correctie van de hoogte van de peilmerken is doorgevoerd zijn metingen van voor 2005 niet gemeten ten opzichte van de huidige

hoogte van het **NAP**. Hier komen we zo weer op terug.

Naast het **NAP** zijn ook andere hoogtesystemen in gebruik. De International Hydrographic Organization (IHO) schrijft het gebruik van **LAT** voor op de Noordzee. Dit niveau verschilt langs de kust en ligt op ongeveer 2,5m onder **NAP** (Slobbe *et al.*, 2013). In de Verenigde Staten wordt hiervoor Mean Lower Low Water (**MLLW**) gebruikt.

Daarnaast worden ook hoogtes ten opzichte van European Terrestrial Reference System 1989 (**ETRS89**), het Europese coördinaatreferentiestelsel gebruikt. Dit stelsel beweegt mee met de verschuiving van Europa. Dit wordt onder andere gebruikt voor de inwinning van gegevens van Basisregistratie Grootchalige Topografie (**BGT**), Basisregistratie Kadaster (**BRK**) en Actueel Hoogtebestand Nederland (**AHN**) en voor geodynamische studies in Europa.

Voor wereldwijde uitwisseling en metingen op basis van Global Positioning System (**GPS**) satellieten is het World Geodetic System 1984 (**WGS84**) in gebruik. Het Actief GNSS Referentie Systeem (**AGRS**) wordt gebruikt om de transformaties tussen **WGS84**, **ETRS89** en **NAP** mogelijk te maken.

Ten slotte wordt vaak gebruik gemaakt van een anomaliteit van de zeespiegel. De term anomaliteit wordt in de aardwetenschappen gebruikt als een verschil ten opzichte van het gemiddelde van een andere periode. Zo worden satellietmetingen gerapporteerd ten opzichte van het gemiddelde over het begin van de meetperiode. Ook klimaatscenario's en zeespiegelmetingen op zee worden vaak ten opzichte van een gemiddelde over een periode uitgerekend.

#### 4.2.1 Het **NAP** en de nulpalen

Terug naar de zeespiegel langs de Nederlandse kust. Deze meten we ten opzichte van het **NAP**. Voor de bepaling van de relativiteit van de stijging van de zeespiegel is het vooral van belang ten opzichte van welk punt de zeespiegel wordt gemeten. Dat werkt als volgt. In het peilhuis staat een Digitale Niveau Meter (**DNM**), de moderne variant van een peilschrijver. Een ouderwetse peilschrijver is nog te zien in het peilhuisje in Herwijnen. Deze **DNM** wordt periodiek gecalibreerd ten opzichte van de **NAP** bout in het station. De hoogte van deze peilbout wordt gebaseerd op basis van een nabijgelegen vast punt.

Doordat het **NAP** een lange historie heeft en niet alle gegevens openbaar beschikbaar zijn is het niet met zekerheid vast te stellen hoe het **NAP** praktisch geïmplementeerd is. Op basis van de beschikbaar gestelde documenten en data komen we tot de volgende beschrijving.

Bij alle getijstations staan nulpalen (1e orde merken) die als vast worden verondersteld. Tot de invoering van de nulpalen (Wemelsfelder, 1958) werden aan de kust bovengrondse peilmerken (2e orde merken, meestal geplaatst in openbare gebouwen) gebruikt (De Bruijne and Voor Geodesie, 2005).

Het **NAP** is dus geïmplementeerd als het vlak door de als vast veronderstelde ondergrondse merken. Per waterpassing is opnieuw bepaald welke merken als vast gehanteerd konden worden. Ter gelegenheid van het 200 jarig bestaan van het (N)AP is een overzicht van de historie van het **NAP** beschreven door Van Dam (2018) en eerder door Van der Weele (1971). De historie is belangrijk omdat er niemand meer leeft die betrokken was bij de eerste waterpassing in 1888.

In de loop van de jaren 1990 ontstond het inzicht dat verschillende peilmerken toch niet zo vast waren. Daarom is een revisie doorgevoerd (ook wel bekend als de **NAP** correctie) in de hoogte



van de nulpalen (Brand *et al.*, 2004). Anders gezegd, het NAP referentiesysteem is opnieuw gerealiseerd wat heeft geleid tot nieuwe hoogtes van de peilmerken (dat is, een nieuw referentiestelsel). Aangezien voor de analyses van zeespiegelgegevens consistentie in het gebruikte referentiestelsel wenselijk is, wordt de sprong in de zeespiegelmetingen als gevolg van de herziening van het NAP verwijderd, zoals eerder beschreven in Dillingh *et al.* (2010).

Dan nog een uitzondering voor het station van Delfzijl. In de vorige paragraaf beschreven we dat de nulpalen als constant werden verondersteld. Dit is niet het geval voor het station van Delfzijl. Toen geconstateerd werd dat de bodem onder Groningen snel daalde ontstond de vraag of ten opzichte van de lokale nulpaal of ten opzichte van de nulpaal voor de bodemdaling begon moet worden gemeten. Uiteindelijk is besloten de nulpaal van Delfzijl en andere nabijgelegen nulpalen van het NAP los te koppelen (De Jong, 1973). Het NAP werd bepaald ten opzichte van peilmerken buiten de bodemdalingsschotel van Groningen. Hierdoor zit de bodemdaling van Groningen niet in de metingen van het station van Delfzijl en moeten we die er nog apart bij optellen om de relatieve zeespiegelstijging te bepalen.

#### 4.2.2 NAP historie

Vanuit de historie van NAP merken hebben we een overzicht gemaakt van de hoogtes van de merken. Deze overzichten zijn niet bedoeld om de bodemdaling absoluut vast te stellen maar te verifiëren dat Delfzijl wel en Hoek van Holland niet van het NAP zijn losgekoppeld. In fig. 4.3 is een overzicht weergegeven van de Nulpalen in de buurt van de getijdestations. Hierin is te zien dat de nulpalen allemaal van hoogte zijn veranderd in de revisie, de NAP correctie in 2005. Een deel van de hoogtes in het archief is reviseerd. Daarnaast is te zien dat de nulpaal van Delfzijl is losgekoppeld van het NAP. De hoogte is niet constant. Ten slotte zien we dat de hoogte van Den Helder is aangepast tussen de vierde en vijfde waterpassing. Het is onduidelijk waarom.

In fig. 4.4 zien we dat de peilmerken in de buurt van de nulpaal van Hoek van Holland van hoogte veranderen. Dit laat zien dat niet alle peilmerken een vaste hoogte hebben gehad. We zien dat de punten dalen. Dit zou logischerwijs bodemdaling tussen de hoogte van de nulpaal en de hoogte van de peilmerken moeten zijn.

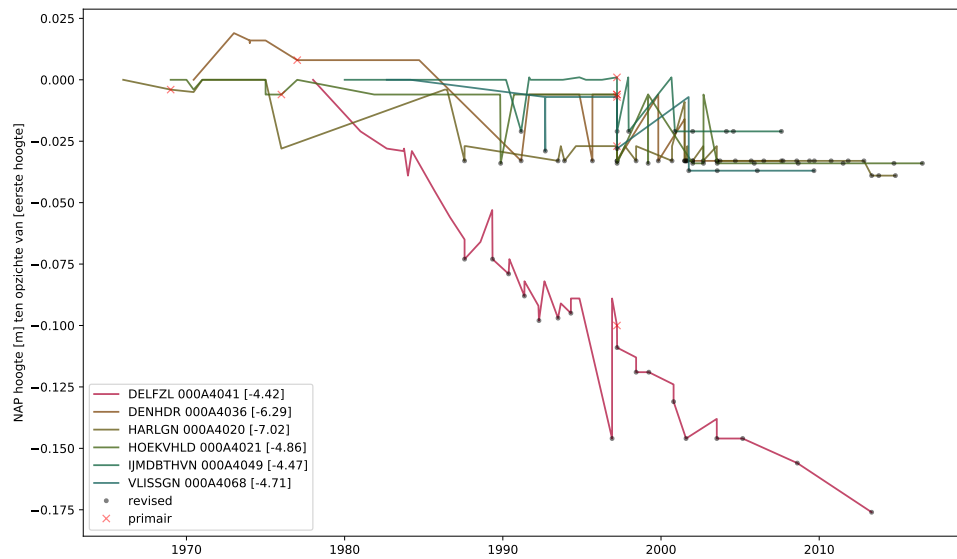
#### 4.3 Satellieten

Deze sectie geeft een overzicht van satellietmetingen van de zeehoogte (altimetrie). De altimetrie satellieten zijn begonnen met meten in 1992, met de lancering van de TOPEX/Poseidon satelliet. Over de afgelopen decennia is met meerdere satellieten de zeehoogte vastgesteld. De satellieten beschikken over een radar altimeter waarmee de zeehoogte wordt vastgesteld.

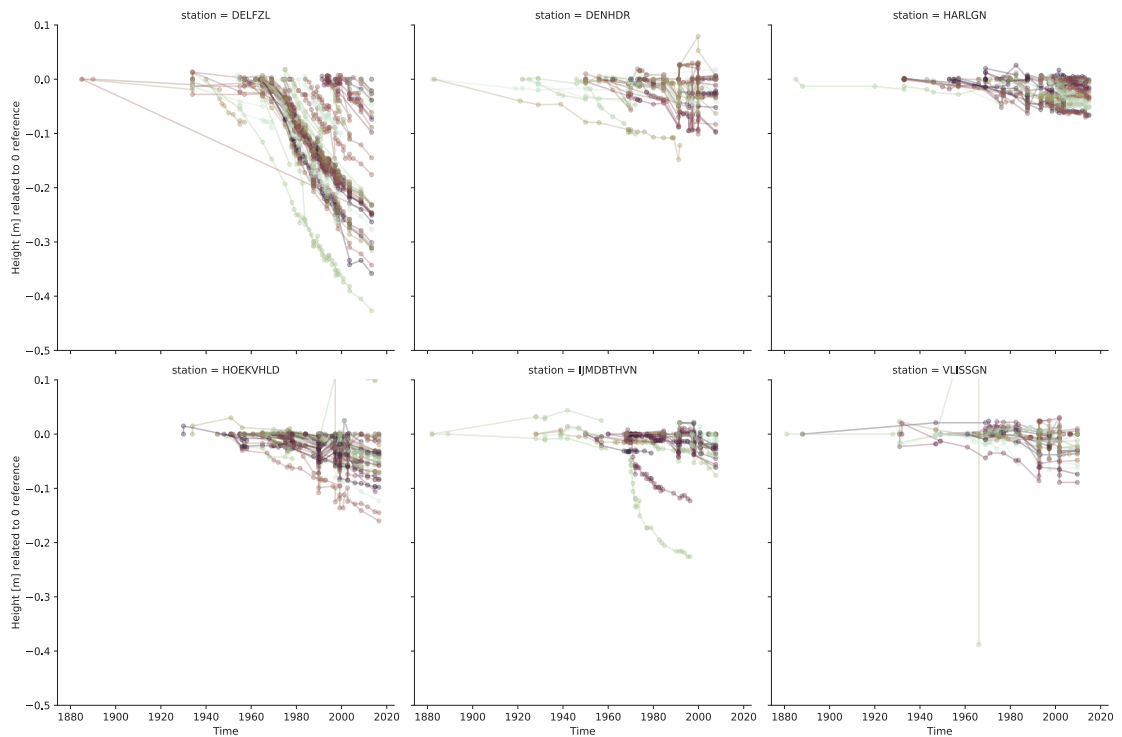
De nadir (naar beneden kijkende) altimetriemetingen worden door verschillende instituten gegrid en gecombineerd in een werelddekkende dataset. Voor dit rapport maken we gebruik van de geïntegreerde dataset van (Zlotnicki *et al.*, 2016). Deze dataset omvat de combinatie van Amerikaanse satellieten (Topex/Poseidon, Jason 1, 2, 3) en Europese satellieten (ERS-1, 2, Envisat, Altika, Cryosat-2 en Sentinel 3). De variabele die we hier gebruiken is de zeespiegel anomalie, dat is de zeespiegelhoogte ten opzichte van de gemiddelde zeespiegel aan het begin van de meetreeks. De gegevens hebben een horizontale resolutie van  $0.167^\circ$  en een temporele resolutie van 6 d.

Deze metingen worden vergeleken met de metingen van de getijstations ter validatie. Daarnaast worden ze gebruikt om de huidige globale zeespiegel en de huidige zeespiegelstijging in de





Figuur 4.3: Overzicht van de historie van de NAP merken in de buurt van de meetstations. Relatief ten opzichte van de eerste meting.



Figuur 4.4: Overzicht van de historie van de NAP merken in de buurt van de meetstations over de hele periode van beschikbare gegevens.

Noordzee te bepalen. In eerdere rapporten werd gebruik gemaakt van de vergridde data van Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data ([AVISO](#)). De huidige data heeft een hogere frequentie (van maand naar 5 dagen) en de verwerkingsprocedure is wat beter beschreven.

De satellieten meten zowel met radar altimeter als met microgolf radiometer. De microgolf radiometer wordt gebruikt om een correctie toe te passen die nodig is omdat er een verstoring optreedt door de waterdamp in de atmosfeer ([Scharroo et al., 2004](#)). Daarnaast is de plaatsbepaling en een schatting van de drift van de satelliet belangrijk.

Door de covariantie tussen satellietparen wordt met kriging (een interpolatie techniek) een vlak gefit. Hiermee wordt in de ruimte geïnterpoleerd. In de tijd wordt lineair geïnterpoleerd. De gegevens worden ter validatie vergeleken met data die weggelaten is uit het verwerkingsproces en met getijstations. De nauwkeurigheid ligt in de orde van 4 cm (Root Mean Square ([RMS](#))).

De satellietdata zijn niet gevalideerd bij kusten en het is bekend dat de radiometer en altimeter “vervuild” kunnen raken door de onzekerheden in de correctie voor getij en doordat de sensor deels land en deels water meet. De radius van de kriging methode zorgt ervoor dat data van nabij de kust en verderaf door elkaar geïnterpoleerd wordt. Daarom wordt aangeraden om voorzichtig te zijn met het interpreteren van data in de buurt van de kust. Recent zijn satellieten gelanceerd (bijv. Sentinel-3A en B) met een wat kleinere ‘footprint’ waardoor dichterbij de kust gemeten kan worden. Zie ([Vignudelli et al., 2011](#)) voor een overzicht van diverse toepassingen.

## 5 Methoden voor de bepaling van de huidige zeespiegel

In hoofdstuk 3 hebben we gezien dat er een ‘huidige zeespiegel’ nodig is, onder andere om de suppletiebehoefte te bepalen. Huidig is in de context van deze toepassing eigenlijk geen tijds-punt, maar een tijdsspanne. Het gaat niet om de zeespiegel vandaag, maar om de zeespiegel van enkele jaren terug tot nu.

Met de ‘huidige zeespiegel’ wordt zowel de huidige stand als de trend die leidde tot de huidige stand bedoeld, dus de huidige zeespiegelstand en de huidige zeespiegelstijging.

Bij het selecteren van de methode worden er diverse afwegingen gemaakt, waarbij we gebruik maken van onderstaande criteria. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de belangrijkste modelkeuzes en de bijbehorende onderbouwing. Deze afwegingen voor het bepalen van een goede maat voor de huidige zeespiegelstijging ten behoeve van het suppletieprogramma en de suppletiebehoefte beantwoorden vraag 1.

**Stabiliteit** methode moet niet van jaar tot jaar te veel variëren

**Spaarzaamheid** parcimonie: principe dat de eenvoudigste van twee plausibele verklaringen de voorkeur heeft

**Robuustheid** trend moet niet te veel afhangen van modelkeuzes en periodes

**Voorspelkracht** toepassing van model in het verleden een goede hindcast opleveren

**Behoudend** methode moet temporeel aansluiten

**Generaliseerbaarheid** methode moet ook werken bij andere stations dan in Nederland

**Power** als er een versnelling is moet de methode dat snel detecteren

### 5.1 Welk model?

Er is een rijke diversiteit aan modellen beschikbaar om een korte termijn trendschatting te maken. Een uitgebreid overzicht van toepassingen in de context van zeespiegeltrends wordt gegeven door [Visser \*et al.\* \(2015\)](#); [Watson \(2016\)](#). Er is weinig consistentie in de literatuur, zie bijvoorbeeld de recente toepassing van een Long Short-Term Memory (LSTM) ([Braakmann-Folgmann \*et al.\*, 2017](#)), een state space model ([Frederikse \*et al.\*, 2016](#)) en een Seasonal Decomposition of Time Series by Loess (STL) ([Breaker and Ruzmaikin, 2011](#)) aanpak. Er is een aantal instituten die een actueel zeespiegelcijfer rapporteren, met name [AVISO](#), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation ([CSIRO](#)), National Aeronautics and Space Administration ([NASA](#)) en de [NOAA](#). Zij rapporteren een zeespiegeltrend op basis van een lineaire trend. Ook in het Compendium voor de Leefomgeving ([CBS and Wageningen, 2018](#)) wordt de zeespiegel als lineaire trend gerapporteerd.

In dit onderzoek maken we gebruik van een Generalized Linear Model (GLM), een gegeneraliseerde vorm van een lineair regressiemodel. Vooral omdat dit opvallend goed werkt ([Watson, 2016](#)) en omdat er geen modellen zijn die zich, op basis van bovenstaande criteria, als betere

hebben bewezen. Omdat we er vanuit gaan dat de zeespiegel sneller aan het stijgen is of binnenkort sneller gaat stijgen maken we ook gebruik van schattingen van de versnelling, zie sectie 5.4.2. Er wordt ook gebruik gemaakt van een Bayesiaanse Markov chain Monte Carlo (MCMC) variant. Dit sluit ook aan bij de aanbevelingen om naar een multimodel aanpak (Baart *et al.*, 2012b; Visser *et al.*, 2015) over te gaan. Merk op dat een lineair model niet impliceert dat de zeespiegelstijging een rechte lijn moet volgen. Ook polynome, sinusoïde, exponentiële en loglineaire modellen vallen onder de GLM familie.

## 5.2 Welke data?

In dit onderzoek maken we gebruik van de 6 zogenaamde hoofdstations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Deze kuststations leveren sinds 1890, toen het NAP overal was doorgevoerd, betrouwbare metingen. In De Ronde *et al.* (2013) is de methode Zeespiegelmonitor op de 6 hoofdstations toegepast. Er is overwogen om de stations uit te breiden met andere stations uit het overzicht in fig. 4.1, maar hierto is niet besloten.

Het station van West-Terschelling (1921) wordt buiten beschouwing gelaten omdat het in de buurt ligt van Den Helder en Harlingen. Het station van Maassluis (1848) ligt kustinwaarts ten opzichte van Hoek van Holland en kan afgesloten worden door de Maeslantkering. Daardoor is de waterstand niet meer gelijk aan die van de open zee. Het station Roompot Buiten heeft een relatief korte historie (jaargemiddelden beschikbaar sinds 1982) en overlapt met Vlissingen. Roompot Buiten heeft wel een belangrijke functie in de operationele toepassing, waarin Roompot Buiten wel en IJmuiden niet als een hoofdstation wordt gezien.

We maken geen onderscheid naar in welke mate de stations zijn beïnvloed door de diverse ingrepen aan de Nederlandse kust. Er hebben 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 vooral de diverse lokale aanpassingen binnen de havens. Deze effecten onderscheiden we niet.

Een andere bron van gegevens zijn altimetriemetingen via satellieten. Voor de Noordzee zijn sinds 1993 gegevens beschikbaar gegrid tot een resolutie van een kwart lengte- en breedtegraad. Deze gegevens worden gebruikt ter verificatie van het absolute deel van de zeespiegelstijging en als bron voor de recente globale zeespiegelstijging. Ook worden gegevens van andere getijstations langs de Noordzee gebruikt, verkregen via PSMSL.

## 5.3 Welke tijdschaal?

Vanuit de literatuur is geen sterke consensus over welke periode gebruikt wordt om over te rapporteren als het gaat om de zeespiegel. In de metingen van getijstations wordt een meetperiode van 60 jaar als kort gezien (Douglas, 2001). In de metingen van satellieten worden veranderingen in de tijdsspanne van 5 jaar apart benoemd (Cazenave *et al.*, 2018).

De gegevens van de getijstations zijn beschikbaar in verschillende temporele resoluties, variërend van jaarlijks tot gegevens per minuut. Voor het bepalen van de gemiddelde zeespiegel wordt de jaarlijks gemiddelde zeewaterstand per kuststation gebruikt. De belangrijkste cyclus in de waterstanden is de 18.613 jarige nodale cyclus. Seizoenseffecten met een kortere schaal hebben geen significant effect op het jaargemiddelde. PSMSL stelt ook reeksen van de maandgemiddelde zeewaterstanden beschikbaar. Deze reeksen vertonen meer variatie en leveren voor

de statistische analyse van de trend in de actuele zeespiegelstijging geen additionele inzichten op. Zie ook de gedetailleerde uitsplitsing per station in het rekendocument [\[4\]](#).

#### 5.4 Welke termen?

De methode in dit onderzoek bouwt verder op de aanpak zoals beschreven in [Baart et al. \(2015a\)](#). De variatie jaargemiddelde zeespiegel wordt beschreven met behulp van een [GLM](#). In deze sectie beschreven we welke termen in dit model meegenomen worden en waarom.

In eenvoudige vorm wordt de waterstand beschreven als de volgende vergelijking:

$$h_t = \text{constante} + \text{trend} + \text{versnelling?} + \text{getij} + \text{wind} + \text{residu} \quad (5.1)$$

De versnelling is optioneel (zie sectie [5.4.2](#)). In sectie [5.8](#) is de gedetailleerde wiskundige vergelijking van het regressiemodel voor de zeewaterstand opgenomen.

##### 5.4.1 Constante en trend

Meestal kijken we naar zeespiegeltrends en naar veranderingen in de trends. Maar eigenlijk net zo interessant is hoe hoog de zeespiegel precies staat. Het nulniveau van het [NAP](#) begon ooit als hoogwater in Amsterdam, toen stond het gemiddeld zeeniveau dus onder [NAP](#) ([Van Veen, 1945](#)). Begin jaren 1980 was de zeespiegel gelijk aan het [NAP](#) en tegenwoordig ligt [NAP](#) onder het gemiddeld zeeniveau.

##### 5.4.2 Versnelling?

We gaan er niet vanuit dat de zeespiegel altijd de trend van de 20ste eeuw blijft volgen. Daarom geven we het model de mogelijkheid om een versnelde of vertraagde zeespiegel uit te rekenen met de optionele versnellingsparameter.

Aansluitend op de literatuur worden twee varianten vergeleken:

- 1 Een kwadratische versnelling. Dit is de gebruikelijke ([Jevrejeva et al., 2014](#); [Church and 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 verg. [\(5.1\)](#)). Op de significantie van deze parameter wordt statistisch getoetst. Deze methode wordt weergegeven met verg. [\(5.3\)](#)
- 2 Een trendbreuk in 1993. Het jaar 1993 markeert het begin van het satelliettijdperk ('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 hogere zeespiegelstijging zien dan de gemeten waterstanden in het getijstationtijdperk ('tide gauge era'). Hierbij wordt 1993 vaak genoemd als de start van de versnelde zeespiegel (bijvoorbeeld [Stocker et al., 2013b](#)). 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. Op de significantie van de trendbreuk wordt statistisch getoetst. Dit gebroken trend model wordt weergegeven in verg. [\(5.4\)](#).

De uiteindelijke modelkeuze (welk model is beter?) vindt plaats op twee criteria. Er moet sprake zijn van een significante acceleratie of deceleratie 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 en de toegevoegde waarde.

Naast de bepaling of er versnelling is die aansluit bij de literatuur gebruiken we ook nog een andere methode om een eventueel knikpunt te bepalen. In dit model kan een breekpunt liggen tussen 1900 en 2000. Er is een trend voor en een trend na het breekpunt. Deze aanpak staat bekend als een MCMC analyse (vergelijk de ‘coal mine’ case study uit [Salvatier et al., 2016](#)). Deze methode stelt vast of er een significante knik is, wanneer die knik het meest waarschijnlijk plaats vond (Maximum A Posteriori (MAP)) en of we een knik hadden gevonden als die er wel geweest was, zie ook de gedetailleerde uitwerking [\[5\]](#).

## 5.5 Getij

Het getij, met name de nodale cyclus, zoals beschreven in paragraaf sectie 2.3.4, wordt meegenomen als gelineariseerde amplitude en fase, in de vorm van een  $u$  en  $v$  component. Het is ook mogelijk om het equilibrium getij op te leggen. In Nederland komt het nodaal getij in de buurt van het equilibrium, maar aan andere kusten komen metingen en het equilibrium getij vooralsnog niet overeen ([Cherniawsky et al., 2010](#); [Baart et al., 2012a](#)). Met het oog op de generieke toepasbaarheid en totdat er uitsluitel is vanuit de literatuur gaan we voorlopig nog uit van het geobserveerde getij.

## 5.6 Wind

Omdat de Nederlandse kust aan een continentaal plat ligt, waar de wind voor een grote opslingering kan zorgen, maken we gebruik van windgegevens. De heranalyses (een combinatie van modellen en historische gegevens) van de National Centers for Environmental Prediction (NCEP) ([Kalnay et al., 1996](#)), op basis van een punt op de Noordzee (lat: 52.38, lon: 3.75), worden gebruikt als basis voor de schatting van de windopzet. De maandgemiddelde Noord-Zuid en Oost-West component worden gebruikt. Ten opzichte van [Baart et al. \(2015a\)](#), waar deze methode in detail beschreven staat, worden de gegevens ongeroteerd gebruikt om de gegevens generieker toepasbaar te maken. Wind heranalyses zijn beschikbaar vanaf 1949.

Naast bovenstaande modelspecificatie is ook gekeken of de windopzetten uit het heranalyses van Global Tidal Surge Model (GTSM) gebruikt kunnen worden. Het doorrekenen van wind naar de kust met een hydrodynamisch model heeft als voordeel dat getij-stromingsinteractie, het inverse barometer effect en stormopzet onderscheiden kunnen worden. Als alternatief zou ook het Dutch Continental Shelf Model (DCSM) gebruikt kunnen worden, zie sectie 10.4.

## 5.7 Residu

Een ander aspect is de autocovariantie tussen de achtereenvolgende jaargemiddelde zeespiegelstanden. Als wind niet in de vergelijking wordt meegenomen is de autocovariantie negeerbaar. Dit jaar voegen we aan de vergelijking toe dat we autocorrelatie meenemen als daar aanleiding voor is (Durbin Watson score ruim onder de 2). In de literatuur is dit beschreven door bijvoorbeeld [Bos et al. \(2014\)](#). Zij adviseren om voor jaargemiddelden een Autoregressie (AR) term mee te nemen, net name een AR1 term, rekening houdend met 1 jaar terug. Zie ook [Visser et al. \(2015\)](#) voor een nadere discussie.

Het standaard lineaire regressiemodel heeft als aanname dat de residuen identieke en onafhankelijke normaal verdeelde kansvariabelen zijn met gemiddelde 0 en (voor alle onafhankelijke variabelen gelijke) standaarddeviatie  $\sigma$ . Het toetsen van deze aannames valt onder de modeldiagnostiek. We voeren de gebruikelijke modeldiagnostiek uit en toetsen op normaliteit van de residuen, heteroskedasticiteit van de residuen (ongelijke standaarddeviatie) en auto- en seriecorrelatie van de residuen (afhankelijkheid). Tot slot zijn we nagegaan of er uitbijters (outliers) in de gegevens zitten. De uitwerking van deze analyses zijn terug te vinden in de reproduceerbare rekendocumenten [\[4\]](#).

## 5.8 Gedetailleerde vergelijking

De volledige vergelijking van het regressiemodel (zonder versnelling of trendbreuk) is in wiskundige notatie als volgt:

$$\begin{aligned}
 h_t = & \beta_{constante} + \beta_{trend}t + \text{versnelling?} \\
 + & \beta_{nodal_u} \cos\left(\frac{2\pi t}{18,613}\right) + \beta_{nodal_v} \sin\left(\frac{2\pi t}{18,613}\right) \\
 + & \beta_{wind_u} u|u|(t) + \beta_{wind_v} v|v|(t) + \varphi h(t-1) + \epsilon_t
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Hierbij is  $h_t$  de zeewaterstand in jaar  $t$ ,  $\beta_{constante}$  is het niveau van de basis zeespiegel in de epoch 1970. gedefinieerd. Parameter  $\beta_{trend}$  beschrijft de lineaire stijging, dat is het aantal eenheden (bijvoorbeeld millimeter) waarmee de zeespiegel ieder jaar stijgt. De amplitude en fase van het 18,613-jarige nodale getij volgen uit de schattingen van de modelparameters  $\beta_{nodal_u}$  en  $\beta_{nodal_v}$ , (zie [Baart et al., 2012a](#), voor details). De parameters  $\beta_{wind_u}$  en  $\beta_{wind_v}$  representeren de invloed van de wind en de daarmee samenhangende luchtdruk. De term  $\varphi$  is de autocorrelatie met de zeespiegelstand van het voorgaande jaar. Voor de term *versnelling?* kan voor de kwadratische versnelling de volgende term ingevuld worden:

$$\beta_{acceleration} t^2 \tag{5.3}$$

Voor de term *versnelling?* kan in verg. (5.2) de volgende term ingevuld worden in het geval van gebroken lineaire trend:

$$\beta_{1993}(t - 1993)(t \geq 1993) \tag{5.4}$$





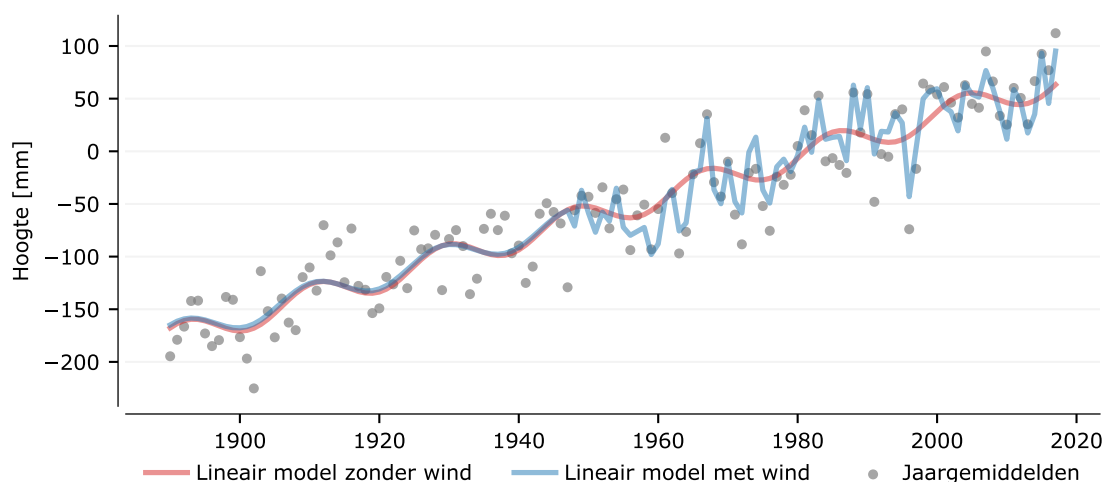
## 6 Resultaten: de huidige zeespiegel

In hoofdstuk 5 hebben we vastgesteld hoe de 'huidige zeespiegel' kan worden uitgerekend. In dit hoofdstuk wordt de huidige zeespiegel voor de periode 1890-2017 vastgesteld. Op basis van deze methode wordt de zeespiegel de komende 3 jaren vastgesteld en beschikbaar gemaakt via een update van bijbehorend interactieve rekendocument [\[4\]](#). Deze update vindt doorgaans plaats in juli of eerder zodra de gegevens van de heranalyses en jaargemiddelde metingen beschikbaar zijn.

### 6.1 De huidige zeespiegel

In fig. 6.1 is de huidige zeespiegel uitgezet tegen de tijd. De huidige zeespiegel is voor 2017 vastgesteld op 6cm boven NAP. Voor het jaar 2017 bedraagt de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust  $1.86 \pm 0.12$  mm/jaar oftewel  $18.6 \pm 1.2$  cm/eeuw [\[4\]](#). Deze trend is berekend over de periode 1890 tot en met 2017. Dit beantwoordt vraag 2, hoe snel de zeespiegel op dit moment stijgt.

De zeespiegel heeft in 2017 zijn hoogste stand ooit gemeten bereikt. Kort gezegd komt dit doordat het voor het eerst sinds lange tijd weer flink heeft gestormd in combinatie met een opgaand nodaal getij en de gestegen zeespiegel.



Figuur 6.1: Huidige zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust op basis van het gemiddelde van de zes hoofdstations, zie ook fig. 6.7 voor alleen de lineaire component. De rode lijn laat de curve zien met gemiddelde wind. De blauwe lijn laat de curve zien gecorrigeerd voor de wind data uit de heranalyses.

De schatting is dat het nodaal getij een amplitude heeft van  $11.0 \pm 5.8$  mm, iets hoger dan, maar niet significant afwijkend van het equilibrium getij. In jaren met veel kustgerichte wind, vanuit het westen, staat de zeespiegel  $10 \pm 2$  mm hoger per  $m^2/s^2$  extra jaargemiddelde wind. Als tijdens een storm het water 3 dagen lang 1.22m hoger staat dan stijgt de gemiddelde zeespiegel voor dat jaar met 1cm. De parameters van de vergelijking staan uitgewerkt in tabel 6.1

	Term	Std. fout	P> z
Constant	-62.4	4.78	0.00
Trend	1.86	0.06	0.00
$Nodal_u$	3.47	2.86	0.23
$Nodal_v$	-10.5	2.97	0.00
$Wind_u^2$	10.9	1.08	0.00
$Wind_v^2$	1.58	2.66	0.55

Tabel 6.1: Overzicht van de parameters van de bepaling van de huidige zeespiegel. De zeespiegel is berekend ten opzichte van post-2005 NAP.

## 6.2 Versnelt de zeespiegelstijging?

Of er een versnelling is stellen we vast door de modellen met versnelling (met acceleratieterm en met knik) te vergelijken met het model zonder versnelling. Geen van beide versnellingsmodellen zijn een significante verbetering ten opzichte van het model zonder versnelling. Dat wil zeggen dat we onder de aanname dat er geen versnelling is een acceleratie of knik hadden verwacht zo groot als we die gezien hebben. Beide modellen zijn vanuit de AIC vergelijking wel een beter model. Zoals beschreven in sectie 5.4.2 kiezen we op basis van de combinatie van deze twee criteria voor het model zonder versnelling. Het model met een acceleratie term laat een vertraagde zeespiegel zien ( $-0.0001 \pm 0.0040$  mm/jaar<sup>2</sup>). Het model met een knik in 1993 laat een hogere zeespiegel zien 2.4mm/jaar na 1993 dan ervoor 1.8mm/jaar, een extra  $0.63 \pm 0.75$  mm/jaar.

Dit beantwoordt vraag 3, of er sprake is van een versnelling van de zeespiegel langs de Nederlandse kust.

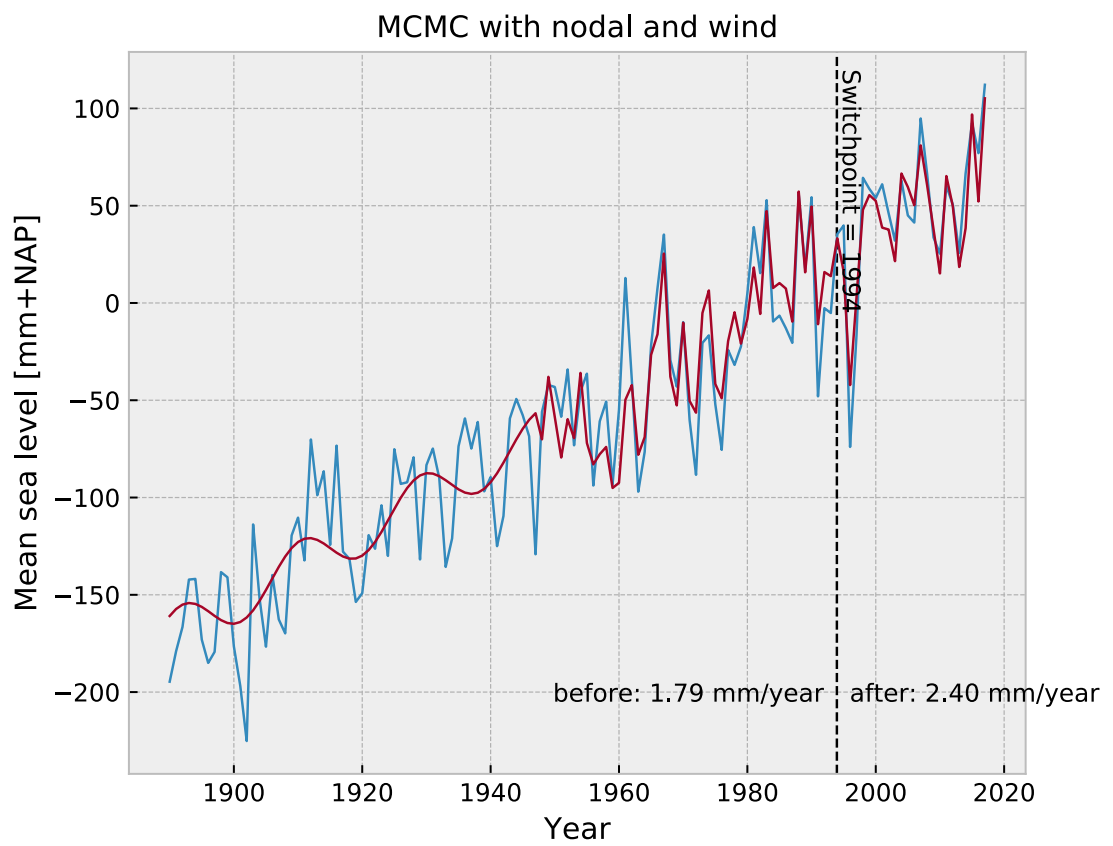
## 6.3 Wanneer gaan we de versnelling zien als deze heeft plaatsgevonden?

Om te kijken of we een versnelling gaan vinden als deze doorzet gebruiken we de MCMC analyse om een a-posteriori kansverdeling van een knikpunt en de voor en na-trend te maken. Dit gaat er vanuit dat we niet weten wanneer een versnelling is opgetreden en dat deze instantaan optreedt. Dit sluit aan bij een deel van de literatuur over 'inflexion points' (Woodworth *et al.*, 2009).

In fig. 6.2 zien we dat het meest waarschijnlijke knikpunt te vinden is in 1994 en dat de trend na de knik 0.6mm/jaar hoger is dan er voor. Dit vinden we ook als we het gebroken trend model toepassen met de trendbreuk vastgesteld op 1993. Dit is vooral toe te schrijven aan de extreem lage zeespiegelstand in 1996.

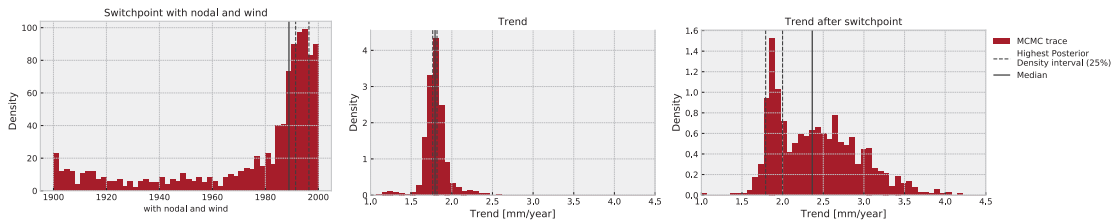
De a-posteriori kansverdeling van het knikpunt en de trends voor en na zijn te vinden in fig. 6.3. Hierin kunnen we aflezen dat het meest waarschijnlijke knikpunt in 1994 lag. De kansverdelingen van de trend voor en na overlappen dusdanig dat we concluderen dat de trend voor en na niet anders zijn. Als de trend na nog 0.5mm/jaar toeneemt dan zou deze nu al significant zijn geweest. 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.

De frequentistische manier om de kans op versnelling uit te drukken is door middel van een power analyse (Cohen, 1988). Omdat er al veel variantie verklaard is heeft een klein effect al een grote kans om op dit moment gevonden te worden. Een extra 0.2mm/jaar zeespiegelstijging, wat overeenkomt met 0.2% extra verklaarde variantie, zou er voor zorgen dat de kans nu 50% zou



*Figuur 6.2: Huidige zeespiegel voor en na het meest waarschijnlijke knikpunt. De blauwe curve zijn de metingen, rode curve het gefitte model.*

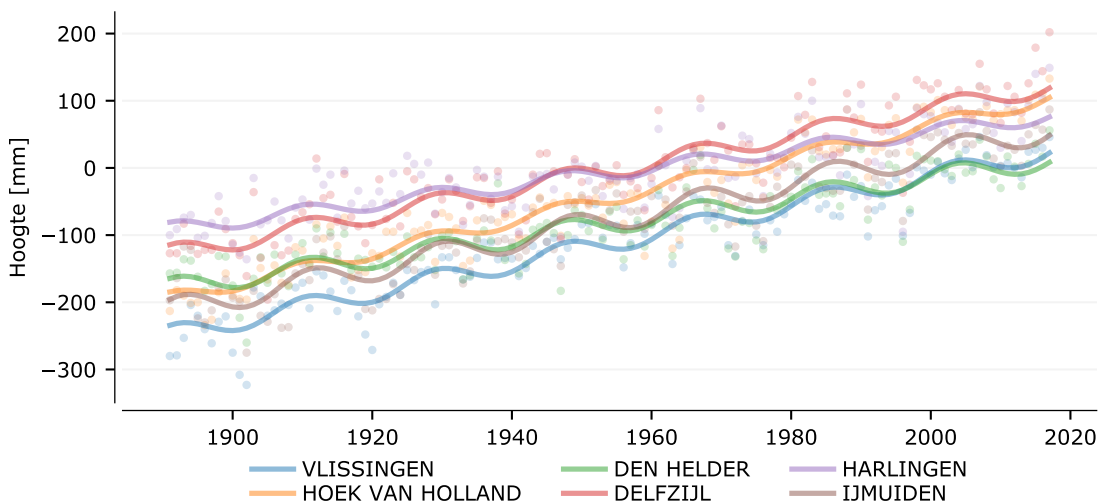
zijn dat een versnelling was gedetecteerd. Als de zeespiegel 0.5mm/jaar extra was gestegen (overeenkomstig met een  $R^2$  van 0.913 ten opzichte van de huidige 0.909), dan was de kans meer dan 80% dat we nu een significante versnelling hadden gezien. Het huidige breekpunt model verklaart slechts 0.1% extra variantie omdat vooral variantie verschuift (door de lagere zeespiegel in begin jaren 1990).



Figuur 6.3: A posteriori kansdichtheidsfuncties van het MCMC model. Links de kansverdeling van het jaar van het knikpunt, midden de trend voor en rechts, de trend na.

#### 6.4 Per station

Figuur 6.4 laat zien dat de zes hoofdstations zowel wat betreft gemiddelde stand als wat betreft trend van elkaar verschillen. In Delfzijl is de trend groter dan bij Harlingen en de trends bij Vlissingen en IJmuiden zijn groter dan de trend bij Den Helder. De zeespiegel stond altijd wat hoger in het noorden van Nederland (bij Harlingen en Delfzijl), maar de relatieve zeespiegel is in Hoek van Holland gestegen ten opzichte van de rest van het land. Op dit moment staat de gemiddelde zeespiegelstand het laagste in Den Helder.



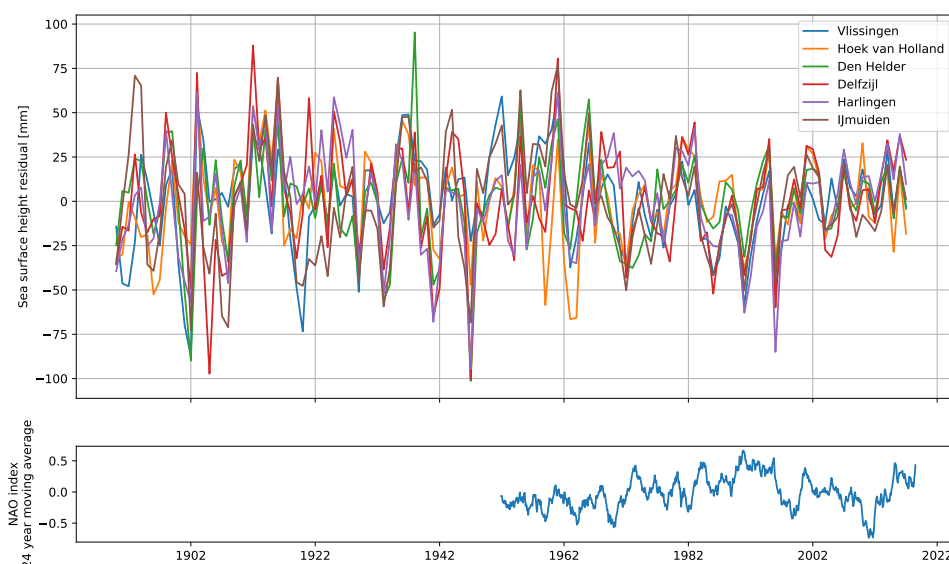
Figuur 6.4: Huidige zeespiegelstijging volgens het lineaire model zonder wind. De trend is voor de 6 getijdstations afzonderlijk weergegeven. Zie ook [\[1\]](#) voor een interactieve variant van deze grafiek waarmee individuele stations geselecteerd kunnen worden. De zeespiegel is uitgedrukt ten opzichte van post-2005 NAP

In fig. 6.5 worden de residuen, het onverklaarde restdeel, weergegeven van de regionale verschillen. We vinden de grootste pieken aan de begin van de meetreeks. Na 1948 worden ze structureel lager omdat we dan de wind als verklarende factor meenemen. Hierin is ook een afwijkend jaargemiddelde in Den Helder te vinden in de jaren 1930, wellicht gerelateerd aan

Station	Trend [mm/jaar]	Std. fout	Niveau in 1970 [mm]	Std. fout
Vlissingen	2.1	0.07	-97	5.7
Hoek van Holland	2.3	0.06	-45	6.6
IJmuiden	2.1	0.08	-74	5.9
Den Helder	1.4	0.06	-101	4.9
Harlingen	1.3	0.07	-38	6.3
Delfzijl	1.9	0.08	-18	5.6

Tabel 6.2: Zeespiegel trends per station.

de aanleg van de Afsluitdijk. Een aantal keer wijkt Delfzijl structureel af, waarschijnlijk door de unieke ligging. De meeste afwijkingen zijn terug te vinden in alle stations tegelijk en vertonen een zekere periodiciteit van ongeveer 6 jaar. Deze is niet toe te schrijven aan de NAO index, die in de figuur is meegenomen. Uit een analyse van met behulp van een principale componenten analyse blijkt dat 96% van de variantie van de jaargemiddelden door een enkele principale component kan worden samengevat, dus dat de stations grotendeels hetzelfde signaal meten.



Figuur 6.5: Residuen, het niet verklaarde deel van de jaarlijkse metingen per station. In de onderste figuur is de NAO weergegeven, data van NOAA.

Er zijn verschillende oorzaken die deze verschillen tussen de stations kunnen verklaren. De beschouwing van deze oorzaken is te vinden in sectie 7.4.1.

## 6.5 Bodemdaling of zeespiegelstijging?

Op basis van de analyse in sectie 2.3.5 en sectie 4.2.1 kwamen we tot de conclusie dat in alle stations de zeespiegelstijging bestaat uit de isostatische en tectonische bodemdalingscomponenten. Er zijn twee stations waaronder winningen voor bodemdaling hebben gezorgd. Dat zijn het station van Delfzijl en het station van Hoek van Holland. In Hoek van Holland gaan we er vanuit dat de winningen in de zeespiegelstijgingen zitten. In Delfzijl weten we vrij zeker dat de

bodemdaling sinds 1973 niet in de gegevens zit. In de periode 1963 tot 1973 daalde de bodem met 7cm. Hier gaan we ervan uit dat deze hetzelfde behandeld is als de bodemdaling na 1973 op basis van (De Jong, 1973, punt 5).

Daarmee komen we tot de uitsplitsing tussen de verschillende absolute bodemdaling- en zeespiegelcomponenten per station, zoals weergegeven in tabel 6.3.

Station	Tectoniek + Isostasie [cm]	Winningen [cm]	Bodem [mm/jaar]	Relatief [mm/jaar]	Absoluut [mm/jaar]
Vlissingen	-2.4	0.0	-0.24	2.1	1.9
Hoek van Holland	-3.7	-1	-0.47	2.3	1.8
IJmuiden	5.0	0.0	-0.5	2.1	1.6
Den Helder	-5.4	0	-0.54	1.4	0.9
Harlingen	-6.0	0	-0.60	1.3	0.7
Delfzijl	-4.8	-24	-0.48	1.9	1.4

Tabel 6.3: Uitsplitsing bodemdaling en zeespiegelstijging per station (bodemdaling uit Hijma and Kooi, 2018). Tectoniek + isostasie, Winningen en Bodemdaling zijn berekend over de periode 1917-2017. Bodemdaling is voor Delfzijl exclusief winning voor IJmuiden inclusief (zie tekst). Relatieve zeespiegelstijging is gemeten over de periode 1890-2017.

In Delfzijl is, sinds in 1963 Nederland aan het gas werd aangesloten, de bodem met 24cm gezakt. Hierdoor is een generatie lang de zeespiegel op het niveau van het hoogste zeespiegelscenario geweest (44cm/eeuw door de winning bovenop de gemeten cm/eeuw). Dit werd niet eerder opgemerkt doordat de peilbout bij het station was losgekoppeld van het NAP. De bodemdaling door gaswinning bij Hoek van Holland is aanzienlijk lager, maar kan wel verklaren waarom de gemeten zeespiegelstijging daar altijd wat hoger is geweest. In totaal is de bijdrage van de bodemdaling ongeveer 0.45 mm/jaar (Hijma and Kooi, 2018).

Dit beantwoordt vraag 4 hoe we absolute bodemdaling en absolute zeespiegelstijging kunnen uitsplitsen.

## 6.6 Scenario's versus de huidige zeespiegel

Zoals we in hoofdstuk 3 gezien hebben zijn er zeespiegelindicatoren gebaseerd op alleen metingen (trends, gemiddelden), de combinatie van modellen en metingen (heranalyses) en indicatoren op basis van toekomstscenario's die berekend worden met modellen. In deze sectie kijken we naar de aansluiting tussen scenario's en metingen.

Zeespiegelscenario's hebben niet dezelfde kwaliteiten als zeespiegelverwachtingen en getijvoorspellingen. Er zijn verschillende termen in gebruik om de toekomst te duiden. Daarom een korte semantische duiding. De volgende termen zijn in gebruik in de context van de zeespiegel (ter indicatie, aantal keer gebruikt op de site rijksoverheid).

**Scenario** (4300) een plausibele toekomstige ontwikkeling, zoals gebruikt door het KNMI en het IPCC: 'Het zou kunnen dat ...'

**Projectie** (260) In klimaat onderzoek kan het een scenario-gedreven simulatie van de toekomst zijn (zie Bray and Von Storch, 2009). 'Het zou kunnen dat ...' + computersimulatie.



**Verwachting** (20100) een meest waarschijnlijke toekomst (deterministisch of probabilistisch), bijvoorbeeld een weersverwachting, zoals gebruikt door [KNMI](#) en door [RWS](#), wordt vaak gebruikt voor de nabije toekomst. 'We hebben geschat dat ...'

**Voorspelling** (818) een verwachting met grote zekerheid, bijvoorbeeld getijvoorspellingen, zoals gebruikt door [RWS](#). 'Het zal zo zijn dat ...'

Andere gebruikte termen, buiten het domein van de zeespiegel, zijn ramingen (4400) (bijvoorbeeld Centraal Plan Bureau ([CPB](#)), ([De Mooij and Tang, 2003](#))) en wat algemener prognoses (2670) en vooruitzichten (1120). Projecties worden ook gebruikt als term voor een naar de toekomst doorgetrokken trend, zoals gebruikt door Centraal Bureau voor de Statistiek ([CBS](#)).

In Nederland wordt doorgaans gebruik gemaakt van de zogenaamde [KNMI](#) scenario's ([Van den Hurk et al., 2014](#)). Het zijn representaties van een plausibele toekomstige ontwikkeling, op basis van paden gedefinieerd door [IPCC](#) ([Stocker et al., 2013a](#)). De paden zijn gebaseerd op een mogelijke toekomstige ontwikkeling van emissie gecombineerd met een verhaallijn ([Moss et al., 2010](#)).

Hier laten we zien hoe de zeespiegelscenario's aansluiten bij de metingen die sinds de doorrekening van de door klimaatverandering gedreven zeespiegelprojecties zijn uitgevoerd. Hierbij moet met een aantal aspecten rekening gehouden worden. Visueel weergegeven in fig. 6.6.

**Epoch** De zeespiegelscenario's zijn relatief ten opzichte van de gemiddelde zeespiegelstand over de periode 1986 tot 2005. De zeespiegel was toen al 2 cm boven [NAP](#), dus de scenario's moeten, indien gepresenteerd samen met getijstations beginnen bij 2cm in 1990.

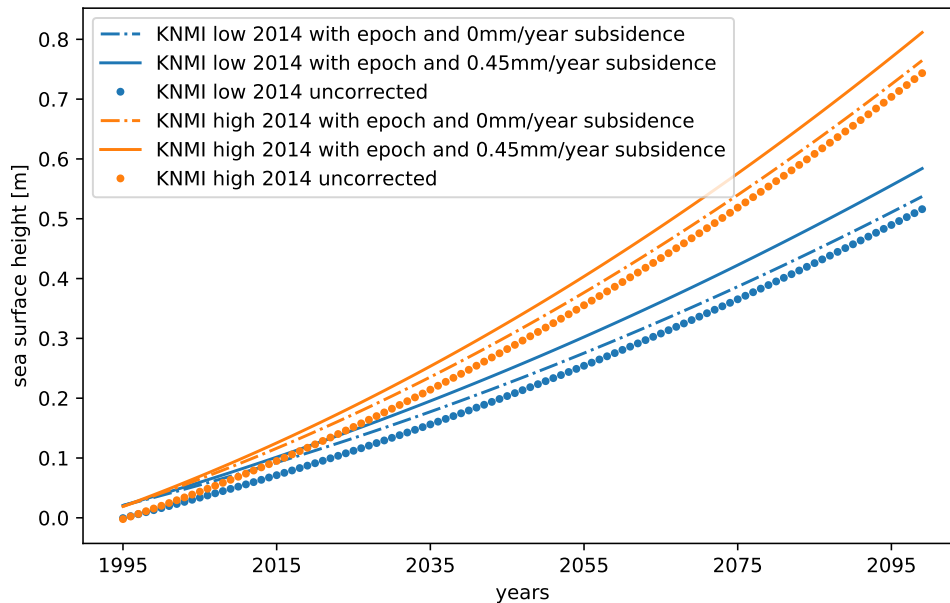
**Absoluut** De zeespiegelscenario's hebben betrekking op de absolute zeespiegel. Als we deze willen vergelijken met de getijdestations moeten we, of van de metingen de bodemdaling af halen, of bij de scenario's de bodemdaling optellen. In fig. 6.7 doen we het laatste, omdat we hier kijken vanuit de toepassing aan de kust.

**Natuurlijke variatie** De zeespiegelscenario's gaan uit van veranderingen ten opzichte van de referentieperiode. Variaties binnen een klimaatperiode, denk aan verschillen van jaar tot jaar door luchtdruk en stormen, zijn niet opgenomen. De jaargemiddelde zeespiegel varieert met een bandbreedte van ongeveer 5cm om de huidige zeespiegel in de scenario's wordt met een natuurlijke variatie van 1.4cm rekening gehouden.

**Marges** De bandbreedte van zeespiegelprojecties neemt toe naar de toekomst. Dit komt doordat verder in de tijd, verandering minder nauwkeurig te berekenen zijn.

**Versnelling** De zeespiegelversnelling in sommige projecties is toe te schrijven aan processen die nu niet grootschalig optreden (bijvoorbeeld ijsklifinstabiliteit).

Voor het gebruik van de informatie dat onze huidige zeespiegel zich nu aan de onder- of bovenkant van een scenario bevindt kan men denken aan toepassingen waarbij men enige vrijheid heeft om een optimistische keuze te maken. Bij optimistische keuzes kan men denken in de context van adaptieve ontwerpen, onderhoud met een flexibele begroting en ontwerpen met goede vervangingsstrategie. Hierbij moet wel steeds rekening gehouden worden met het voorzorgsprincipe. Het principe dat als er gevaar is en sprake is van een onzekerheid, dat men de veilige kant moet kiezen. Dat betekent echter niet altijd zo hoog mogelijk bouwen, het wordt ook geïnterpreteerd als beter monitoren en zoals in de Waddenzee nu gehanteerd wordt, de hand aan de (gas en zout)kraan houden.



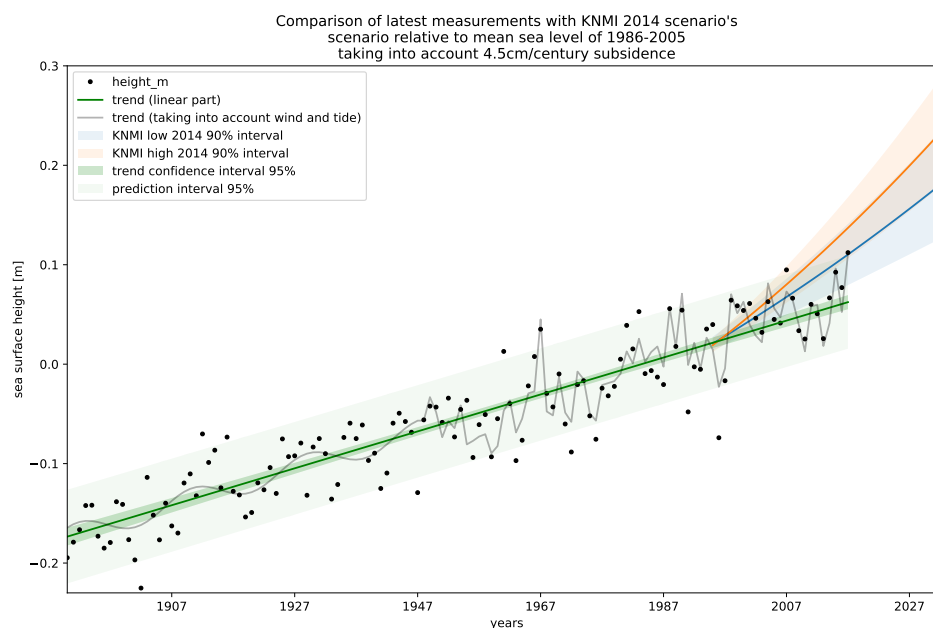
Figuur 6.6: Toegepaste correcties om KNMI 2014 zeespiegelscenario's (Van den Hurk et al., 2014) vergelijkbaar te maken met relatieve zeespiegelstijging van de getijdestations.

In fig. 6.7 zien we dat als we rekening met bovenstaande aspecten dat de huidige zeespiegel nu aan de onderkant ligt van het laagste scenario. 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 berekende (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 zeespiegel. De conclusie is wel dat we achter liggen op schema.

We concluderen dat langs de Nederlandse kust het zeespiegelscenario behorende 'hoog' boven de daadwerkelijk opgetreden toename in zeeniveau zit. De projecties horende bij 'laag' komen in de buurt van de metingen maar overlappen niet meer met het betrouwbaarheidsinterval van de huidige trend. De variatie van de zeespiegel van jaar tot jaar ontbreekt in de zeespiegelprojecties.

De constatering dat het lage KNMI scenario het beste bij de huidige zeespiegelstijging aansluit beantwoordt vraag 5.



*Figuur 6.7: Vergelijking tussen metingen en zeespiegelscenario's van (Van den Hurk et al., 2014), inclusief bodemdaling. De bandbreedte van de KNMI scenario's is gebaseerd op een polynome fit door de 90% percentielen van de ensemble members. De betrouwbaarheids (donkergroen) en predictieintervallen (lichtgroen) van de trend van de huidige zeespiegel zijn gebaseerd op de 95% percentielen van de verdeling van de standaardfout en standaardafwijking van het gebruikte model om de zeespiegelstijging te bepalen.*

## 6.7 Nederland versus buurlanden

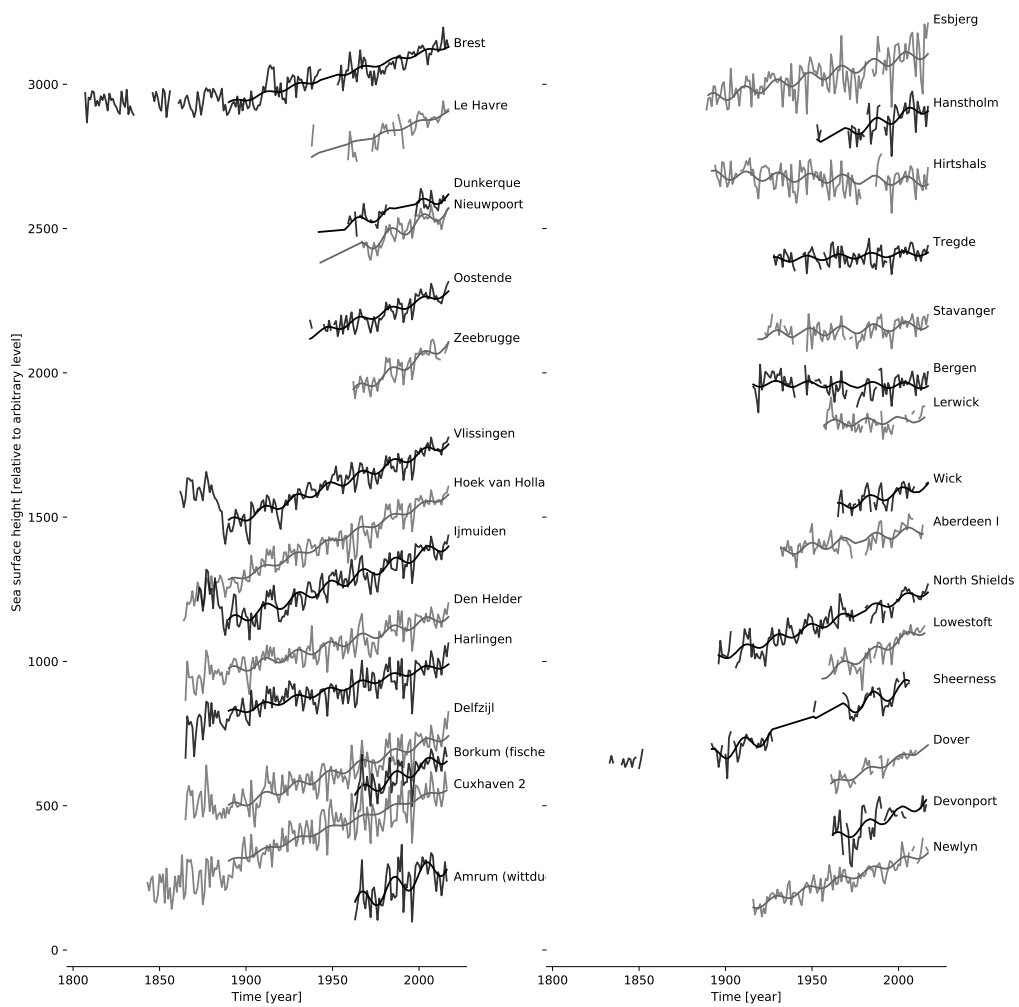
Naast Nederland hebben ook de andere landen die aan de Noordzee liggen een historie van metingen van de zeespiegel. De stations laten een consistent beeld zien van een zeespiegelstijging in de orde van 15cm/eeuw Wahl et al. (2013). In fig. 6.8 zien we dat de stations grotendeels dezelfde variatie laten zien. De stations in Noorwegen komen omhoog, daarom is daar geen relatieve zeespiegelstijging maar is deze gelijk of daalt deze. Er zijn veel verschillen te zien tussen de stations voor de periode 1890, voor er goede hoogtereferentiestelsels waren.


## 6.8 Nederland versus globaal

Als we de Nederlandse zeespiegel vergelijken met de globale zeespiegel dan kunnen we kijken naar de globale zeespiegelstijging zoals deze aan de kust gemeten wordt, of naar de zeespiegelstijging zoals gemeten op de oceaan door satellieten. In dit geval kijken we vooral naar de zeespiegel zoals gemeten langs de kust.

Het vergelijken van de Nederlandse kust met andere stations gaat niet zo maar. Getijstations worden niet geplaatst om de globaal gemiddelde zeespiegel te meten, maar omdat er ergens een haven ligt, of omdat er een probleem met zeespiegelstijging is. Daardoor liggen de getijstations, net als in Nederland, vooral in havens. Veel havens liggen op het noordelijk halfrond.


Om met deze scheve ruimtelijke verdeling rekening te houden worden zogenaamde reconstructies gemaakt. Er is veel variatie in de methoden waarop deze reconstructies worden gemaakt. Recente voorbeelden van reconstructies zijn Hay et al. (2015), en Frederikse et al. (2018) en

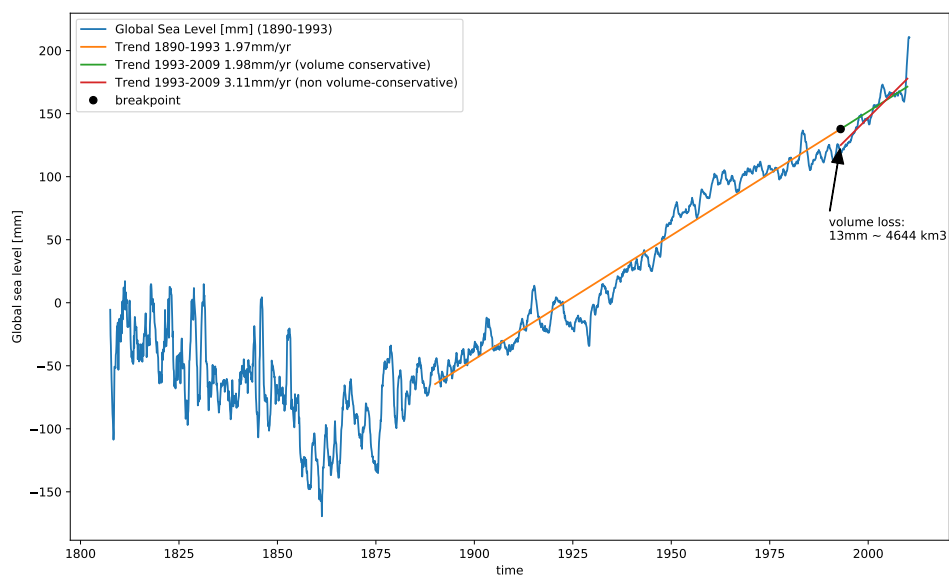


Figuur 6.8: Zeespiegelmetingen van diverse stations in Frankrijk, België, Denemarken, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk. 

(Jevrejeva *et al.*, 2014).

De meeste reconstructies komen er op uit dat de zeespiegel in de 20e eeuw gemiddeld steeg in het bereik 1.4 mm/jaar tot 2.0 mm/jaar. Er zijn ook reconstructies die een knikpunt leggen in de jaren 1990, bijvoorbeeld Dangendorf *et al.* (2017) komen uit op 1.1mm/jaar over de periode 1900-1990. De hoogste snelheden ziet men in de jaren 30 en 40 van de 20ste eeuw en in de laatste 20 jaar. Ook Jevrejeva *et al.* (2014) vinden een recente versnelling. Houston and Dean (2011) vonden de recente versnelling niet terug toen ze naar individuele stations keken.

Een mogelijke verklaring voor de discrepantie tussen de resultaten van Houston and Dean (2011) en Jevrejeva *et al.* (2014) zit in hoe omgegaan wordt met het aansluiten van periodes (volume-conservatieve trends versus niet volume conservatieve trends). Indien trends uitgerekend worden over een periode zonder deze aan te laten sluiten met de periode ervoor kan een gat ontstaan tussen twee curves. Zonder behoud van volume is de zeespiegelstijging over de periode 1993-2009 met 3.1mm gestegen. Met behoud van volume is de zeespiegelstijging over dezelfde periode gelijk aan ervoor, zie fig. 6.9. Volume conservatieve trends kunnen berekend worden door eerst de trend over de beginperiode uit te rekenen en door bij de volgende periode een vast nulpunt op te leggen of door een gebroken trendmethode toe te passen .



*Figuur 6.9: De zeespiegelstijging op basis van de reconstructie van Jevrejeva *et al.* (2014), met en zonder behoud van volume. De groene curve is berekend op basis van de volumebehoudende methode, waarbij het zwarte punt als beginpunt van de curve na 1993 is opgenomen. Bij de rode curve is in 1993 4644km<sup>3</sup> verloren gegaan. De rode curve komt overeen met de trend uit Jevrejeva *et al.* (2014).*

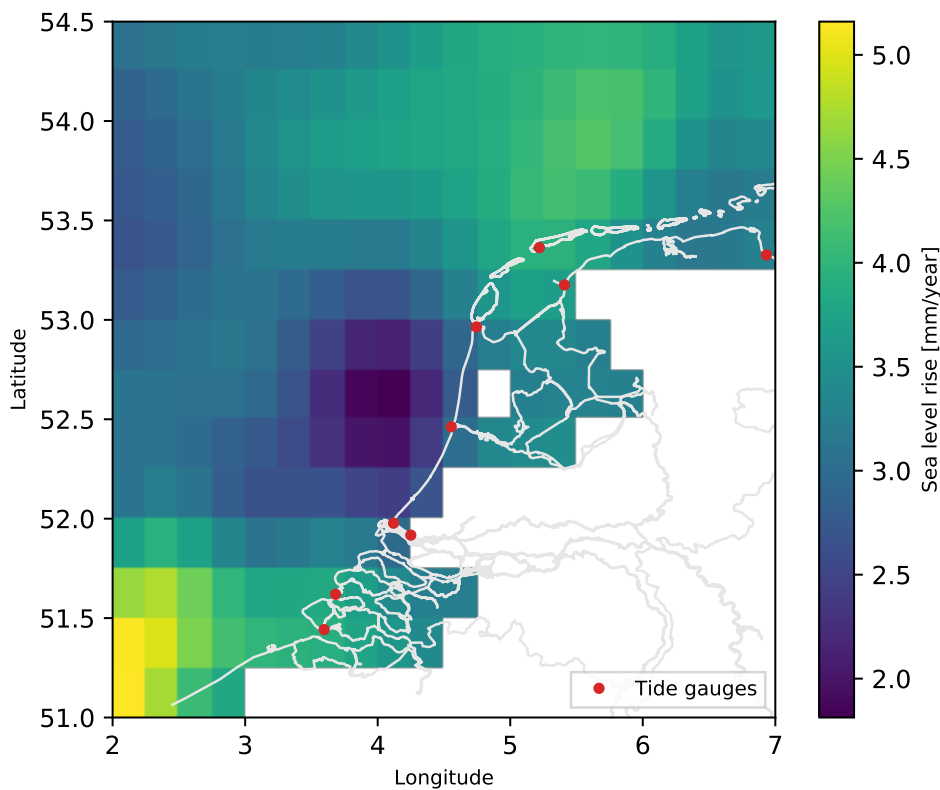
Samengevat kunnen we stellen dat over de 20ste eeuw, de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust aan de onderkant ligt van de globale schattingen. De zeespiegelstijging ligt over de periode 1993-2017 ook lager dan globaal. Op basis van de knik aanpak komen we op een absolute zeespiegelstijging van  $2.4 - 0.45 = 1.95$ mm/jaar over de periode 1993-2017. De 0.45mm/jaar is de eerder genoemde bodemdalingcomponenten met uitzondering van de daling van Hoek van Holland door winning. De globale cijfers zijn in de orde van 3mm/jaar. Deze

worden gevonden op basis van satellietmetingen (zie bijvoorbeeld [Watson et al., 2015](#)) en in reconstructies van getijstations ([Jevrejeva et al., 2014](#)).

### 6.9 Vergelijking met satellietmetingen

Net als voor de getijreeksen kijken we ook naar de satellietmetingen. Dit doen we vooral ter verificatie. In theorie zou de absolute zeespiegelstijging, zoals gemeten met satellieten, samen met de bodemdaling overeen moeten komen met de zeespiegelstand en zeespiegeltrend zoals gemeten met de getijstations.

Om de nauwkeurigheid van de aansluiting te bepalen zou men bij voorkeur naar de vergelijking van gemeten hoogtes ten opzichte van hetzelfde verticale referentie vlak kijken. Satellietgegevens worden ontsloten als anomalieën, berekend ten opzichte van een gemiddeld niveau over een bepaalde periode. Op basis van de anomalieën, kunnen we alleen trends met elkaar vergelijken.



Figuur 6.10: Gemiddelde snelheid van de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust op basis van satellietmetingen. De snelheid is berekend door het lineaire model te fitten op de jaargemiddelde zeespiegels. De rode punten geven de zes Nederlands hoofd-getijdestations aan. [↗](#)

Het resultaat hiervan is te zien in fig. 6.10. Deze kaart laat zien dat er regionale verschillen in stijgsnelheid zijn voor in de Noordzee. De rode punten geven de getijdestations weer waarvoor de gegevens beschikbaar zijn via PSMSL.

Voor deze rode punten hebben we voor beide de satellietdata en de metingen van de getijdestations het model gefit. De trend komt voor beide datasets enigszins overeen, en de standaardfouten ook. Doordat aan het begin van de reeks, vooral in 1996 de zeespiegel laag stond en aan het eind van de reeks hoog (door nodaal getij en wind) is de trend in deze vergelijking hoger dan wat we de 'huidige zeespiegelstijging' noemen (zie voor details [4b](#)).

Door het ontbreken van een absolute aansluiting aan het begin van de meting, de korte periode waarvoor de gegevens beschikbaar zijn, de beperkte kwaliteit bij de kust, de hogere meetfout en lagere meetfrequentie maken de satellietgegevens een minder geschikte bron om de huidige zeespiegelstijging uit af te leiden. De ruimtelijke dekking maakt de gegevens geschikt om ruimtelijke variatie in de Noordzee te onderzoeken. In tegenstelling tot vorige versies van de zeespiegelmonitor, redelijke samenhang tussen de beide bronnen wat betreft ruimtelijke variatie.

#### **6.10 Modelkeuzes en aannames**

Omdat de zeespiegel van vorig jaar informatie bevat die gebruikt kan worden om een goede voorspelling te doen van de zeespiegel dit jaar wordt een autocorrelatie term toegevoegd.

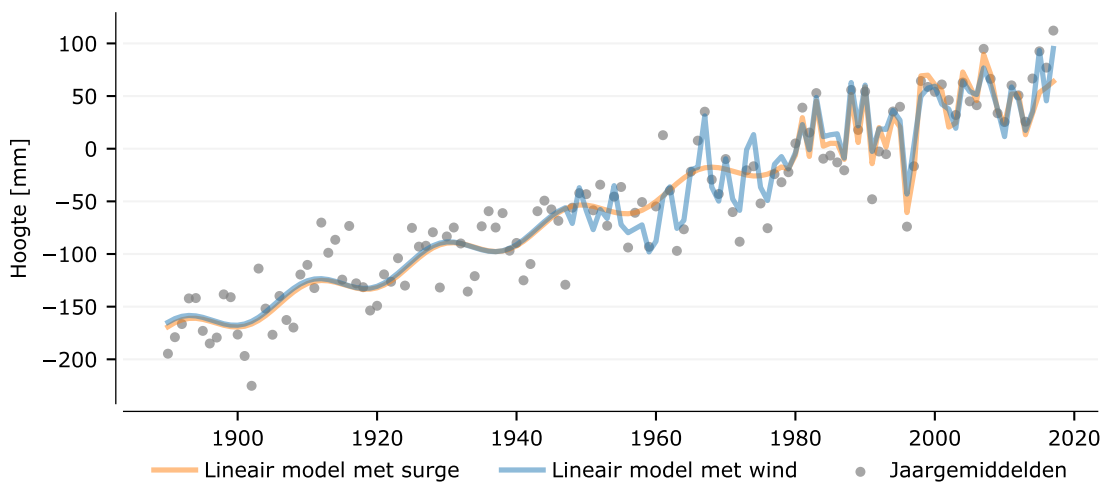
De variantie van de residuen is afhankelijk van de verklarende variabelen (meer residu bij veel wind). Voor het herkennen van een trendbreuk is het belangrijk dat de trendparameter zo betrouwbaar mogelijk wordt geschat. De standaardfouten zijn daarom op robuuste wijze geschat via de zogenaamde Heteroskedasticity 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 zeespiegel, alleen op de standaardfouten.

#### **6.11 De volgende generatie: heranalyses voor wind en getij**

In de bijlage in sectie 10.4 is onderzocht of het gebruik van stormopzetten uit GTSM van toegevoegde waarde is voor het bepalen van de zeespiegelstijging. Als test zijn de berekende stormopzetten, berekend per station en over de stations gemiddeld, aan het model toegevoegd. Deze beogen dezelfde fysica te beschrijven als de wind op de Noordzee. Beide aanpakken laten goede resultaten zien over de periode (1979-2014) fig. 6.11. Voorlopig zijn de resultaten van GTSM voor deze periode beschikbaar. De windreeksen zijn beschikbaar vanaf het jaar 1949. Doordat de stormopzetten nog niet actueel (binnen 6 maanden na afloop van een jaar) beschikbaar zijn gaat de voorkeur voor deze versie van de Zeespiegelmonitor nog uit naar het gebruik van de gemeten windsnelheden. De GTSM aanpak is iets beter in het beschrijven van de extreemste jaren, zoals 1996. Daarom zal op de GTSM overgestapt worden zodra de heranalyses actueel beschikbaar zijn.





*Figuur 6.11: Huidige zeespiegelstijging volgens het lineaire model met **GTSM** en met geobserveerde wind. De trend is gefit op de jaargemiddelde waarden voor de 6 stations.*

## 7 Discussie

In de voorgaande hoofdstukken hebben we gekeken naar de oorzaken van zeespiegelstijging, de toepassingen in het Nederlands beleid en hebben we de actuele of huidige zeespiegelstand en -stijging bepaald. In deze context is er nog een aantal punten die relevant zijn om te bespreken.

### 7.1 Versnelling

De zeespiegel aan de Nederlandse kust stijgt. We zien geen noemenswaardige versnelling. Dat roept bij menigeen vragen op als: 1 Hadden we niet al versnelling verwacht? 2 Meten we wel goed? 3 Hebben we niet te veel ruis? 4 Versnelt de zeespiegel bij ons anders dan de globale zeespiegel? 5 Zit er ergens zeespiegelstijging verstopt?

Allereerst, hadden we al een versnelling verwacht? De eerste Deltacommissie rekende al met een zeespiegelstijging van 70cm ([Van Dantzig, 1956](#)), voor de toen komende eeuw. Ook recente scenario's voor de Nederlandse kust gaan uit van een huidige versnelling ([Van den Hurk et al., 2014](#)). Deze versnelde zeespiegel komt terug in verschillende toepassingen, zowel planologisch (voor 200 jaar vooruit ruimte gereserveerd), als in het ontwerp (bovenkant Oosterscheldekering is in het ontwerp vervangbaar), als in het kader van adaptief beheer (door kustsuppleties afhankelijk van de zeespiegelstijging). Een overzicht van globale projecties is beschreven door ([Garner et al., 2018](#)). We houden dus al geruime tijd rekening met een aankomende versnelling.

Meten we wel goed? Als we kijken naar de metingen dan zien we dat we, met 300 jaar ervaring, de dubbel uitgevoerde instrumenten en een groot aantal stations die ter validatie kunnen dienen, een solide basis hebben om de toestand van de zeespiegel aan de kust vast te stellen. De metingen zijn onderling consistent fig. 6.4. De metingen van de Nederlandse getijstations zijn ook consistent met onze burens en tot op zekere hoogte met de satellietmetingen, zoals beschreven in sectie 6.9, (zie ook [Sterlini et al., 2017](#)). Er zijn dus geen redenen om aan te nemen dat we niet goed meten.

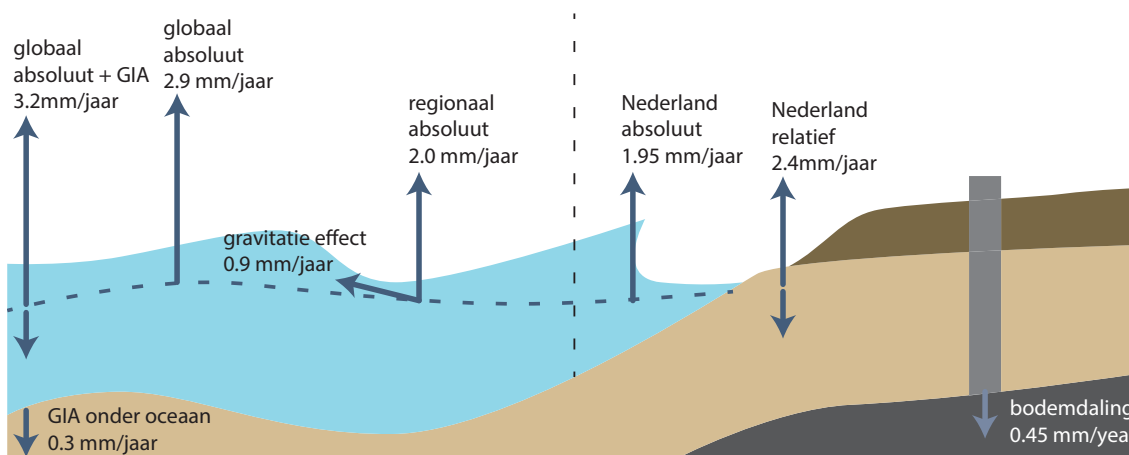
Hebben we niet te veel ruis? In sectie 6.3 hebben we gezien dat als er een noemenswaardige versnelling plaats vindt, dat we deze ook snel zullen zien. We zien deze ook snel omdat de gegevens van Nederlandse getijstations dagelijks worden ontsloten. Onderliggend is vaak de vraag of we een wereldwijde versnelling wel in Nederland zien. De Nederlandse metingen zijn niet bedoeld en ook niet geschikt om iets te zeggen over de globale zeespiegelstijging. Omdat we van het massaverlies van Groenland weinig verwachten te zien zijn de Nederlandse gegevens niet representatief voor de rest van de wereld. Daarom kijken we in deze rapportage niet alleen naar de Nederlandse zeespiegel, maar ook naar de globale. Dit sluit aan bij de methodiek om indicatoren te kiezen op basis van verschillende kwaliteiten. Voorbeelden van kwaliteiten zijn te vinden in de literatuur, bijvoorbeeld de aansluiting bij strategische doelen ([Van Koningsveld and Mulder, 2004](#)), geloofwaardigheid, overtuigingskracht ([Haasnoot et al., 2018](#)), scherpheid (zien we zeldzame gebeurtenissen), integriteit (is er niet met de data gerommeld) en reproduceerbaarheid (veranderen de resultaten als iemand anders ze analyseert) ([Baart, 2013](#)).

De afwijking tussen de Nederlandse en de globale zeespiegelstijging hebben we verder uitgewerkt. Aan de ene kant verklaringen die het verschil nog groter maken (4.5cm/eeuw van onze relatieve zeespiegelstijging is bodemdaling). Maar ook hebben we in sectie 2.3.1 gezien dat een groot deel van de wereldwijde zeespiegelstijging, ongeveer 9cm/eeuw niet bij ons terecht komt.

Een klein deel van onze zeespiegelstijging, 2cm voor het station Hoek van Holland, komt door de gaswinning. Een deel van de wereldwijde zeespiegelstijging (3cm/eeuw) kunnen we niet meten met de getijstations omdat het een correctie is voor de zakking van het oceaانبekken door de GIA. De wereldwijde versnelling die geconstateerd wordt door Nerem *et al.* (2018), binnen de periode 1993-2017, zien we ook niet terug. Om de versnelling te vinden was een correctie nodig voor de uitbarsting van de Pinatubo en El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Deze correcties passen we in de zeespiegelmonitor niet toe.

Een deel van de globale zeespiegel kan niet verklaard worden door de onderliggende processen (Cazenave *et al.*, 2018). Een recente reconstructie vindt een lagere zeespiegelstijging over de periode 1900-1990 van  $12 \pm 2$  cm/eeuw, dat komt ongeveer overeen met onze absolute zeespiegelstijging over dezelfde periode. Ze vinden een zeespiegelstijging van  $30 \pm 7$  cm/eeuw over de periode 1993 tot en met 2010. Deze versnelling zien we maar in zeer beperkte mate terug (19cm/eeuw absolute zeespiegelstijging over 1993 tot en met 2017 op basis van het breekpunt-model).

Sommerend komen we op de volgende balans van de wereldwijde versus de Nederlandse zeespiegelstijging over de periode 1993-2017. De zeespiegelstijging over deze periode is in Nederland wat hoger dan over andere perioden, zoals besproken in sectie 6.2, vooral door de lage zeespiegelstand in 1996. Eigenlijk zou de zeespiegelstijging hoger moeten zijn dan globaal, omdat in Nederland naast de zeespiegelstijging ook nog bodemdaling is. Maar omdat 3cm van de globale zeespiegelstijging een correctie is die niet aan de kust gemeten wordt (3cm) en omdat we op een gunstige plek liggen wat gravitatie effect betreft (9cm) zien we aan de kust van Nederland toch een lagere zeespiegelstijging dan globaal, zoals weergegeven in fig. 7.1. Andere effecten, zoals veranderingen in dichtheid, zijn hier buiten beschouwing gelaten.



*Figuur 7.1: Verschillen tussen de Nederlandse en de globale zeespiegelstijging over de periode 1993-2017. Links globaal: zeespiegelstijging op basis van satellietmetingen vertaald naar regionale absolute zeespiegelstijging. Rechts Nederland: zeespiegelstijging over de periode 1993-2017 vertaald naar absolute zeespiegelstijging. Om de Nederlandse gegevens absoluut te maken moet de bodemdaling verwijderd worden. Om de globale gegevens naar Nederland te vertalen moet voor het gravitatie effect worden gecorrigeerd en moeten gegevens van volumes naar absolute stijging worden vertaald door de GIA correctie ongedaan te maken.*

Concluderend zien we een recent verschil tussen wat we meten langs de Nederlandse kust en wat we globaal meten, maar dit kunnen we verklaren met de verschillen tussen wat we aan de kust meten en wat globaal gemeten wordt. We moeten wel enig voorbehoud maken bij de praktijk van het sluitend maken van budgetten, waar we hierbij aansluiten. Het is een confirmatieve

analyse, in de zin dat er wordt gezocht naar ‘sluiting’ in plaats van dat de theorie op de proef gesteld wordt. Vergelijk de stelling “Confirming evidence should not count except when it is the result of a genuine test of the theory” die door [Popper \(2014\)](#) gebruikt wordt om onderscheid te maken tussen wetenschap en pseudo-wetenschap.

Dat het optelt wil, net als bij een echte boekhouding, daarom ook niet zeggen dat het klopt. Op basis van fig. 6.9 kunnen we ook tot de conclusie komen dat de 3.2mm/jaar gebaseerd is op een statistisch artefact en dat er geen globale zeespiegelversnelling is. Hebben we nu een globale versnelling gezien of hebben we alleen de achterstand ingehaald? Hoe gaan we om met perioden van een vertraagde zeespiegel? Genoeg vragen voor verder onderzoek.

Dit beantwoordt vraag 7, waarom de Nederlandse zeespiegelstijging afwijkt van de globale zeespiegelstijging.

De vraag of er nog ergens zeespiegelstijging verstopt zit is vooral relevant voor de toekomst. Het hele oppervlak van de oceaan wordt gemeten. Van de variatie van de zeespiegel is, achteraf, het grootste deel verklaarbaar. Naar de toekomst toe zijn er wel veel openstaande vragen. Welk deel van het ijs van Antarctica smelt als eerste? Zal de bodem onder Antarctica snel genoeg terugveren om de zeespiegelstijging te stoppen? Hoe lang gaat de bodemdaling nog door nadat we stoppen met de gaswinning? Als de [AMO](#) verandert, welk effect heeft dat op onze zeespiegeltrend? Dat zijn echter onderwerpen die we in de Zeespiegelmonitor niet behandelen.

## 7.2 Toepassing

In dit onderzoek hebben we de huidige zeespiegel en huidige zeespiegelstijging bepaald. Deze zijn bedoeld om te gebruiken als maat voor de bepaling van het suppletievolume. In deze sectie beschouwen we de mogelijke toepassingen wat breder.

De overwegingen die gebruikt zijn bij het definiëren van de huidige zeespiegelstand en zeespiegelstijging zijn vooral relevant in de context van vandaag. De zeespiegeltrends zijn niet bedoeld om de verwachte zeespiegelstand in 2050 of 2100 te bepalen. Tegelijkertijd zien we dat zeespiegelscenario's niet bedoeld zijn om op de korte termijn wat te zeggen. Daarom kiezen we een periode van tot 15 jaar vooruit, een halve klimaatperiode, als de periode waarvoor we het gebruik van de huidige zeespiegel maximaal aanraden.

Een huidige zeespiegelstand op zichzelf is niet geschikt voor beoordelingen van veiligheid. Daarvoor is de verwachte maximale zeespiegel nodig (getij + absolute zeespiegel + bodemdaling + hoogwater + golven) ten opzichte van de hoogte van de keringen. Het kan wel als component gebruikt worden. Het is raadzaam de componenten te scheiden.

In de context van ontwerp, beheer, beoordeling en planvorming liggen de toepassingen dus vooral voor korte termijn ontwerpen, beheer en beoordeling. In de planvorming gebruikt men zichttermijnen van tientallen tot 200 jaar. Om dit kengetal beter te kunnen bepalen geven we in de volgende paragraaf nog een opzoekgrafiekje waarmee het op basis van de huidige zeespiegelstand is op te zoeken.


Dit beantwoordt vraag 8, welke kenmerkende waarden voor de zeespiegel aansluiten bij de verschillende toepassingen.

### 7.3 Nederland onder zeespiegel

Zoals we gezien hebben in sectie 3.5, vertellen we aan buitenlandse bezoekers vaak trots welk deel van Nederland onder de zeespiegel ligt. Daarnaast gebruiken we dit getal graag als makkelijke intro, Nederland ligt voor xx% onder zeeniveau, dus zeespiegelstijging is belangrijk, dus we gaan onderzoek doen naar zeespiegelstijging. Vergelijkbare opvulkengetallen zijn welk deel van de wereld bij de kust ligt, welk deel van de wereld in een delta ligt en welk deel overstromingsgevoelig is. Het zijn getallen die we noemen maar niet tot een concrete actie leiden.

Het probleem met het xx% van Nederland ligt onder zeeniveau is dat we het al jaren verkeerd gebruiken. Sinds het verkeerd in het IPCC rapport stond hebben we een ruwe schatting (Author, 2010). Maar we gebruiken het nog steeds vaak verkeerd (Rutte, 2016) of we formuleren het in vage termen als 'a lot of land below sea level' (Rutte, 2017).

We bevestigen dat eerder genoemde getallen als twee derde van Nederland ligt onder zeeniveau, de helft van Nederland ligt onder zeeniveau en een derde van Nederland ligt onder zeeniveau niet accuraat zijn. Soms wordt er een vorm gebruikt als xx% van Nederland ligt onder NAP gelijk aan gemiddeld zeeniveau. Ook dat is niet meer accuraat sinds de jaren 80 van de vorige eeuw.

Het percentage van Nederland (ten tijde van AHN2) dat onder het huidige zeespiegel ligt is 27%. Het percentage van Nederland dat onder NAP ligt is 26%. Voor de andere percentages geldt dat een derde van Nederland ligt onder een zeespiegelniveau van 60cm boven NAP, de helft van Nederland ligt onder een zeespiegelniveau van 4m en twee derde van Nederland ligt onder een niveau van 11m. De berekening is beschikbaar via een reproduceerbare berekening  op basis van AHN2 en de TOP10 vector water.

Omdat het percentage van Nederland onder de zeespiegel een populaire indicator is, rechtstreeks gekoppeld aan de huidige zeespiegelstand nemen we deze indicator voortaan op in deze rapportage.

### 7.4 Hoe relatief willen we meten?

Disussies over hoe relatief we de zeespiegel meten worden vrij snel verwarrend omdat we een theoretisch NAP hebben en daar een concrete implementatie van hebben die over de tijd veranderd is. Historische gegevens van het NAP en belangrijke documenten over de nulpalen zijn moeilijk achterhaalbaar. Doordat de details hierover niet publiek ontsloten zijn is het nagenoeg onmogelijk om een compleet accuraat beeld te vormen.

Je kan je afvragen hoe bruikbaar het referentiestelsel als zodanig is voor de toepassing in de context van de zeespiegel. Vanuit het perspectief van de monitoring van de zeespiegel zijn we vooral geïnteresseerd in de relatieve zeespiegelstijging. Daarom is de implementatie, het referentiestelsel, eigenlijk handiger dan dan het referentiesysteem van het NAP. Zouden we namelijk precies het vlak volgen van de Amsterdam en tegenwoordig de Veluwe tot aan de kust en ten opzichte daarvan de zeespiegel meten, dan zouden we de relatieve zeespiegel meten met daarin de bodemdaling van vroeger Amsterdam en nu de Veluwe.

Gelukkig wordt hier al veel aandacht aan besteed. Naar het publiek toe is in het kader van het 200 jarig bestaan al moeite gestopt om de historie te documenteren (Van Dam, 2018). Er is een lespakket beschikbaar via Rijkswaterstaat. Ook de in 1982 opgerichte stichting NAP houdt zich bezig met publieksgerichte informatie, zoals het onderhouden van een tentoonstelling ingericht in de Stopera.

In de toekomst, als de gegevens bij de kust nauwkeuriger worden, zullen we geleidelijk op satellietmetingen over kunnen stappen voor zowel absolute zeespiegelmetingen en absolute bodemdaling.

Om deze transitie goed uit te voeren is het belangrijk dat we een ruime periode van dubbeluitgevoerde metingen hebben inclusief de aansluiting op globale en lokale hoogterefereentiesystemen. Voorlopig zijn lokale metingen ten opzichte van waterpassingen nauwkeuriger. De GNSS hoogtes zijn onnauwkeuriger te meten en maken gebruik van een quasi-geoïde.

#### 7.4.1 Verschillen binnen Nederland

Zowel de zeespiegelstand (hoe hoog ligt de lijn) als de zeespiegelstijging (hoe steil is de lijn) variëren langs de Nederlandse kust. Daarvoor zijn verschillende mogelijke oorzaken waarvan we er een aantal hebben teruggezien.

**Bodemdaling** Het ten opzichte van elkaar verzakken van de nulpalen (sectie 6.5).

**Absolute zeespiegel** De absolute zeespiegelstijging is niet uniform verdeeld door bijvoorbeeld dichtheidsvariaties, stromingvariaties, gravitatieeffect en interacties tussen bijvoorbeeld zeespiegelstijging en getij (sectie 6.9)

**Meettechnieken** er kunnen verschillen zijn in de manier van meten (hoofdstuk 4)

**Overige** daarnaast kunnen lokale ingrepen en onbekende oorzaken veranderingen veroorzaken (sectie 7.4.1)

De verschillen van de stand tussen de stations kan doordat we meten ten opzichte van lokale nulpalen. De hoogte van deze nulpalen is vastgesteld met waterpassing. De standaardafwijking van de hoogtes ligt in de orde van 4mm (Brand *et al.*, 2004). Tijdens het aanleggen van de peilmerken lag deze nauwkeurigheid in de orde van 10mm (De Bruijne and Voor Geodesie, 2005) (voor een afstand van 200m). De variatie tussen de stations ligt in de orde van 25millim. De variatie tussen de stations kan voor een deel verklaard worden door de nauwkeurigheid van de waterpassingen, maar een deel blijft onverklaard.

De verschillen in de trend tussen de getijdestations kunnen we niet verklaren op basis van de variatie in bodemdaling, zoals te zien in sectie 6.5. Het is mogelijk dat een deel van de stijging van Delfzijl is toe te schrijven aan de bodemdaling, tussen het begin van de gaswinning en de loskoppeling van het peilmerk. Maar dit is niet wat er toen beschreven is, zie sectie 4.2.1. In de metingen met satellieten zien we dezelfde langsvariatie van de zeespiegel als die we langs de kust meten. Dezelfde orde van grote van variatie is ook terug te vinden in een reconstructie (Frederikse *et al.*, 2016) met het DCSM (Gebraad and Philippart, 1998). De gravitatie effecten zijn groot genoeg om een deel van de verschillen te verklaren fig. 2.7.

De belangrijkste conclusie is dat de zeespiegel langs de Nederlandse kust niet uniform hoeft te zijn. Een uitgewerkt voorbeeld van hoe verschillen in luchtdruk en temperatuur resulteerden in grote zeespiegelvariaties tussen stations in Florida (Domingues *et al.*, 2018) laat zien dat de zeespiegel langs dezelfde kust kan dalen en versnellen tegelijk.

Van de bekende interventies zien we de aanleg van de Afsluitdijk terug in Den Helder. De grootste effecten van veranderingen aan de kust zien we terug in getijamplitudes (Hollebrandse, 2005). Het bepalen van de effecten van de aanleg van objecten op basis van alleen tijdseries is een

beetje koffiedik kijken. Als er een verandering optreedt kort na een interventie is dat nog niet zeker een causaal verband. De verandering had niet moeten optreden als de interventie niet uitgevoerd was, en dat weten we niet. Daarom is het beter om dit soort analyses uit te voeren door een combinatie van effect studies met modellen en verificatie met metingen.

Dit overwegende komen we tot de conclusie dat de oorzaken van de verschillen in trends tussen de stations het meest waarschijnlijk hun oorsprong vinden in absolute zeespiegelvariaties. De verschillen in absolute waarden kunnen veroorzaakt zijn door de methodiek van de nulpalen en de vaststelling van het [NAP](#). Het uitrusten van alle stations met [GNSS](#) zou hier, op termijn, uitsluitel over kunnen geven. Dit beantwoordt vraag [6](#), waarom de stations langs de Nederlandse kust van elkaar verschillen.



## 8 Conclusie

### 8.1 Antwoorden

Dit rapport beschrijft een nieuwe versie en actualisatie van de huidige zeespiegelstijging ten behoeve het suppletieprogramma (vraag 1, beantwoord in hoofdstuk 5). Deze methode laat zien dat de zeespiegel, over de periode 1890 tot en met 2017, met een snelheid van 18.6cm/eeuw is gestegen tot 6cm boven NAP (vraag 2 in sectie 6.1). Er is er geen sprake van een versnelde zeespiegel langs de Nederlandse kust (vraag 3, beantwoord in sectie 6.2).

Een deel (4.5cm/eeuw) van de gemeten zeespiegelstijging langs de kust komt door bodemdaling. Dit rapport maakt een beter onderscheid naar de verschillende bodemdalingscomponenten (vraag 4, beantwoord in sectie 6.5).

Doordat de zeespiegel niet sneller is gaan stijgen en doordat de zeespiegelstijging voor een deel uit bodemdaling bestaat is de huidige zeespiegelstijging lager dan het laagste KNMI 2014 scenario. Het laagste scenario sluit dus het beste aan (vraag 5, beantwoord in sectie 6.6).

Er zijn verschillen waar we in detail naar hebben gekeken. De zeespiegelstijging verschilt tussen de zes hoofdstations en de Nederlandse zeespiegelstijging is niet gelijk aan de globale zeespiegelstijging. De stations langs de Nederlandse kust verschillen van elkaar omdat de absolute zeespiegelstijging niet gelijk is langs de kust (vraag 6, beantwoord in sectie 7.4.1). De stijging wijkt af van de globale zeespiegelstijging omdat Nederland gunstig ligt ten opzichte van het smeltend ijs en omdat het volume van de dalende oceaanbodem bij de zeespiegelstijging wordt opgeteld (vraag 7, beantwoord in sectie 7.1).

Verschuivende toepassingen maken gebruik van diverse indicatoren van de zeespiegel, stand of stijging, met of zonder bodemdaling, met verschillende zichtsduren en voor verschillende type toepassingen (ontwerp, beheer, beoordeling en planvorming). Er is geen aansluiting tussen de toepassingen (vraag 8, beantwoord in sectie 7.2).

### 8.2 Aanbevelingen

Het bij elkaar brengen van inzichten over bodemdaling en zeespiegelstijging leert ons dat in Delfzijl een grote relatieve zeespiegelstijging heeft plaatsgevonden zonder dat dit uit de meetreeksen bleek. Vanuit dit oogpunt adviseren we om bodemdaling en zeespiegelstijging altijd bij elkaar meten en te modelleren. Dit kan door elk station met een GNSS uit te rusten en deze gegevens ook te analyseren.

Een deel van de conclusies was eerder, eenduidiger en makkelijker te trekken als de documenten en gegevens van RWS vollediger en opener publiek beschikbaar waren. We adviseren om de historische gegevens en documenten van RWS beter te ontsluiten.

Uit sectie 10.1 nemen we het advies over om de verschillende kenmerkende waarden (bijv. gemiddelde scheve opzet, jaarmaxima, getijamplitudes en fases, extreme waarde verdelingen) te controleren op i) Mate van documentatie, ii) Traceerbaarheid, iii) Overdraagbaarheid, iv) Herhaalbaarheid, en v) Herleidbaarheid. Dit kan opgepakt worden in de context van de verbetering van

de ontsluiting.

Het delen van data is in de zeespiegelwereld steeds meer gemeengoed geworden, maar het delen van code en gebruik van versiebeheer om de traceerbaarheid te vergroten nog niet. In sectie 10.1, sectie 10.2 en sectie 10.4 wordt daarom geadviseerd om software code, data en modellen beter beschikbaar te stellen, inclusief kwaliteitscontroles (reviews, validaties, testen). De code van de zeespiegelmonitor is beschikbaar onder [Baart et al. \(2017\)](#).

In sectie 10.4 werd voorgesteld om naast de huidige methode ook reconstitucties te gebruiken van getij en windopzet. Hierbij is het belangrijk dat van de modellen [GTSM](#) en [DCSM](#) geactualiseerde heranalyses met ruime temporele dekking beschikbaar zijn.

Er is veel variatie tussen de verschillende toepassingen van de zeespiegelkengetallen. De gebruikte methoden zijn niet altijd consistent. Voor toepassingen aan de kust wordt soms gebruik gemaakt van absolute zeespiegelstijging, terwijl de relatieve zeespiegelstijging (inclusief bodemdaling) relevant is. We adviseren om deze indicatoren beter op elkaar af te stemmen.

De huidige zeespiegelstijging in deze methode is geschikt voor toepassingen op de termijn tot 15jaar vooruit, een halve klimaatijdschaal, bijvoorbeeld voor ontwerpen met een korte levensduur, kustbeheer en beoordeling (indien frequent genoeg). Gebruik klimaatscenario's voor langere tijdschalen, met name ontwerpen met een levensduur van langer dan 15jaar en voor planning.

Er zijn veel alternatieve feiten in omloop rond de zeespiegel. Dat maakt het voor het publiek lastig om goed inzicht te hebben in de huidige toestand van Nederland in de context van het water. We adviseren [RWS](#) om de publieksgerichte informatie te intensiveren met een nadruk op consistentie en volledigheid.

### 8.3 Vervolgonderzoek

Het onderzoek naar zeespiegel heeft een enorme vlucht genomen. Per jaar verschijnen er nu op basis van schattingen van Web of Science bijna 4000 wetenschappelijke papers met de zeespiegel als onderwerp. Dit was in het jaar 2000 nog 1300 en in 1980 verschenen 49 papers. Paradoxaal lijken deze inspanningen niet te leiden tot een scherper beeld van de zeespiegel, integendeel. Er is sprake van wat te boek staat als 'negative learning' ([Oppenheimer et al., 2008](#)). Over de 20e eeuw lopen de schattingen steeds meer uiteen. Ook de recente ontwikkeling van steeds hogere extreme zeespiegelscenario's worden als zodanig geduid ([Garner et al., 2018](#)). Het is daarom belangrijk om opportuun en kritisch te zijn in het bepalen van toekomstige onderzoeksinspanningen.

Thema's die al in regelmatig worden onderzocht zijn zeespiegelbudgetten (globaal en regionaal), reconstitucties (globaal), trend methodes, schattingen van de sterische (globaal en regionaal) en massa componenten (globaal en regionaal) en aansluiting tussen metingen en scenario's (globaal).

Voor de schatting van de Nederlandse zeespiegel is het vooral relevant om degelijke globaal toepasbaar maar lokaal verfijnde heranalyses te hebben van de lokale componenten van de variaties in de zeespiegel. We hebben nu een verbeterde versie van de bodemdaling componenten. De heranalyse die het meest van de zeespiegelvariates kan verklaren beschrijft de historie van getij en wind. Deze zijn in het kader van het Copernicus programma in de maak. Deze zouden

nog verder verfijnd kunnen worden. Indien de heranalyses van sterische componenten, zoals Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) (Behringer and Xue, 2004) over met een grotere tijdsspanne en hogere resolutie (kilometers) beschikbaar komen zijn deze ook te overwegen om op te nemen.

Scenario's uit het verleden liggen boven de geobserveerde Nederlandse zeespiegelstijging. Dat noopt tot een methodologische reflectie. In de dagelijkse water- en weersvoorspellingen laten we de berekening alvast een tijdje draaien zodat we deze kunnen laten bijsturen door de metingen. Daarnaast is het tegenwoordig standaard om van de modellen een voorspelkracht (Skill Score) uit te rekenen om een indruk te geven van de waarde van het de uitkomst. In de operationele weersvoorspellingen (Bauer *et al.*, 2015), kustmodellen (Baart *et al.*, 2015b), overstromingsmodellen (Teng *et al.*, 2017) en hydrologisch modellen (Liu *et al.*, 2012) heeft dit tot een kwaliteitsimpuls geleid. We raden aan om deze innovaties ook in de klimaatscenario aanpak door te voeren.



## 9 Referenties

- Abidin, H. Z., H. Andreas, I. Gumilar, Y. Fukuda, Y. E. Pohan and T. Deguchi, 2011. "Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development." *Natural Hazards* 59 (3): 1753. URL <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>. 26
- Author, U., 1954. "Nederlandse dijken zijn meters gezakt." *De waarheid* 13 (1477). URL <https://resolver.kb.nl/resolve?urn=ddd:010369213:mpeg21:a0064>. 14
- , 2010. "Correctie formulering over overstromingsrisico Nederland in IPCC-rapport." URL <http://www.pbl.nl/dossiers/klimaatverandering/content/correctie-formulering-over-overstromomgsrisico>. 34, 70
- , 2012. *Modelkeur 2012*. Tech. rep., Unie van Waterschappen. 36
- Baart, F., 2013. *Confidence in Coastal Forecasts*. Ph.D. thesis, Technical University of Delft. 67
- Baart, F., P. H. A. J. M. van Gelder, J. de Ronde, M. van Koningsveld and B. Wouters, 2012a. "The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates." *Journal of Coastal Research* 28 (2): 511–516. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-11-00169.1>. 50, 51
- Baart, F., K. K. Ha, A. van Dam, G. Donchyts and M. Siemerink, 2014. "Interactive web-based flood modeling at country wide scale and planter size resolution." In *Proceedings of the International Congress on Environmental Modelling and Software*. San Diego, United States of America. 13
- Baart, F., M. van Koningsveld and M. J. F. Stive, 2012b. "Trends in Sea-Level Trend Analysis." *Journal of Coastal Research* 28 (2): 311–315. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-11A-00024.1>. 48
- Baart, F., R. Leander, J. de Ronde, H. de Vries, V. Vuik and R. Nicolai, 2015a. *Zeespiegelmonitor 2014*. Tech. Rep. 1209426.202, Deltares, HKV en KNMI. 12, 32, 49, 50
- Baart, F., M. van Ormondt, J. van Thiel de Vries and M. van Koningsveld, 2015b. "Morphological impact of a storm can be predicted three days ahead." *Computers & Geosciences* pages —. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300415300881>. 75
- Baart, F., G. Rongen, R. Nicolai and C. van de Vries, 2017. "Sea-level monitor." URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.1065964>. 74
- Bauer, P., A. Thorpe and G. Brunet, 2015. "The quiet revolution of numerical weather prediction." *Nature* 525: 47 EP —. URL <https://doi.org/10.1038/nature14956>. 75
- Begum, S., M. J. Stive and J. W. Hall, 2007. *Flood risk management in Europe: Innovation in policy and practice*, vol. 25. Springer Science & Business Media. 12
- Behringer, D. and Y. Xue, 2004. "Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean." In *Proc. Eighth Symp. on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface*. AMS 84th Annual Meeting, Washington State Convention and Trade Center . . . . 75

- Boer, G. de, 2009. *On the interaction between tides and stratification in the Rhine Region of Freshwater Influence*. Ph.D. thesis, TU Delft, Delft University of Technology. 24
- Bos, M. S., S. D. P. Williams, I. B. Araújo and L. Bastos, 2014. “The effect of temporal correlated noise on the sea level rate and acceleration uncertainty.” *Geophysical Journal International* 196 (3): 1423–1430. URL <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggt481>. 51
- Braakmann-Folgmann, A., R. Roscher, S. Wenzel, B. Uebbing and J. Kusche, 2017. “Sea Level Anomaly Prediction using Recurrent Neural Networks.” *arXiv preprint arXiv:1710.07099* . 47
- Brand, G., G. van Brussel, J. ten Damme and J. Gerritsen, 2004. “Herberekening van het primaire net van het NAP; Verbetering precisie en betrouwbaarheid ten behoeve van de nieuwe NAP publicatie.” *Adviesdienst Geo-informatie en ICT* . 44, 71
- Bray, D. and H. von Storch, 2009. ““Prediction” or “Projection”?: The Nomenclature of Climate Science.” *Science Communication* 30 (4): 534–543. URL <https://doi.org/10.1177/1075547009333698>. 58
- Breaker, L. C. and A. Ruzmaikin, 2011. “The 154-year record of sea level at San Francisco: extracting the long-term trend, recent changes, and other tidbits.” *Climate Dynamics* 36 (3): 545–559. URL <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0865-4>. 47
- Bruijne, A. de and N. C. voor Geodesie, 2005. *De geodetische referentiestelsels van Nederland: definitie en vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties*. NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie. 43, 71
- Buisman, J. and A. v. Engelen, 2006. *Duizend jaar weer, wind en water in de Lage Landen. Dl. 5. 1675-1750*. Van Wijnen, Franeker. In Dutch. 18
- Caldwell, D. R., 1978. “The maximum density points of pure and saline water.” *Deep Sea Research* 25 (2): 175–181. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014662917890005X>. 18
- Camuffo, D., C. Bertolin and P. Schenal, 2017. “A novel proxy and the sea level rise in Venice, Italy, from 1350 to 2014.” *Climatic Change* 143 (1): 73–86. URL <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1991-3>. 18
- Cazenave, A., B. Meyssignac, M. Ablain, M. Balmaseda, J. Bamber, V. Barletta, B. Beckley, J. Benveniste, E. Berthier, A. Blazquez *et al.*, 2018. “Global sea-level budget 1993-present.” *Earth System Science Data* 10 (3): 1551–1590. 17, 48, 68
- CBS, P. and U. Wageningen, 2018. “Compendium voor de Leefomgeving.” *Diverse indicatoren. Centraal Bureau voor de Statistiek, Planbureau voor de Leefomgeving & Wageningen UR, Den Haag/Bilthoven/Wageningen* . 47
- Chamberlin, T. C. and F. R. Moulton, 1909. “The Development of the Planetesimal Hypothesis.” *Science* 30 (775): 642–645. URL <http://www.jstor.org/stable/1635742>. 22
- Chambers, D. P., A. Cazenave, N. Champollion, H. Dieng, W. Llovel, R. Forsberg, K. von Schuckmann and Y. Wada, 2017. “Evaluation of the Global Mean Sea Level Budget between 1993 and 2014.” *Surveys in Geophysics* 38 (1): 309–327. URL <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9381-3>. 16
- Chen, J., J. S. Famiglietti, B. R. Scanlon and M. Rodell, 2016. *Groundwater Storage Changes: Present Status from GRACE Observations*, pages 207–227. Springer International Publishing, Cham. URL [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4_9). 20

- Cherniawsky, J. Y., M. G. Foreman, S. K. Kang, R. Scharroo and A. J. Eert, 2010. "18.6-year lunar nodal tides from altimeter data." *Continental Shelf Research* 30 (6): 575 – 587. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434309002921>. 50
- Church, J. A. and N. J. White, 2011. "Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century." *Surveys in Geophysics* 32: 585–602. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>. 49
- Clark, J. A. and C. S. Lingle, 1977. "Future sea-level changes due to West Antarctic ice sheet fluctuations." *Nature* 269 (5625): 206–209. URL <http://dx.doi.org/10.1038/269206a0>. 22
- Clark, P. U., J. X. Mitrovica, G. A. Milne and M. E. Tamisiea, 2002. "Sea-Level Fingerprinting as a Direct Test for the Source of Global Meltwater Pulse 1A." *Science* 295 (5564): 2438–2441. URL <http://science.sciencemag.org/content/295/5564/2438>. 22
- Cleveland, W. S., 1979. "Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots." *Journal of the American Statistical Association* 74 (368): pp. 829–836. URL <http://www.jstor.org/stable/2286407>. 13
- Cohen, J., 1988. "Statistical power for the behavioral sciences . Hillside." 54
- Dam, P. J. van, 2018. *Van Amsterdams Peil naar Europees referentievlak: de geschiedenis van het NAP tot 2018*. Uitgeverij Verloren. 43, 70
- Dangendorf, S., M. Marcos, G. Wöppelmann, C. P. Conrad, T. Frederikse and R. Riva, 2017. "Re-assessment of 20th century global mean sea level rise." *Proceedings of the National Academy of Sciences* URL <http://www.pnas.org/content/early/2017/05/16/1616007114>. 63
- Dantzig, D. van, 1956. "Economic decision problems for flood prevention." *Econometrica* 24 (3): 276–287. 67
- Deltacommissie, 1960. *Rapport Deltacommissie. Dl. 1. Eindverslag en interimadviezen*. Staatsdrukkerij- en Uitgeverijbedrijf, 's-Gravenhage. URL <http://repository.tudelft.nl/file/1219694/382018>, in Dutch. 33
- , 2008. *Samen werken met water: een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst; bevindingen van de Deltacommissie 2008*. S.n, S.I. URL <http://www.deltacommissie.com/doc/2008-09-03%20Advies%20Deltacommissie.pdf>. 33
- Deschamps, P., N. Durand, E. Bard, B. Hamelin, G. Camoin, A. L. Thomas, G. M. Henderson, J. Okuno and Y. Yokoyama, 2012. "Ice-sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 years ago." *Nature* 483 (7391): 559. 18
- Dickman, S., 1988. "Theoretical investigation of the oceanic inverted barometer response." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93 (B12): 14941–14946. 25
- Dillingh, D., 2013. *Kenmerkende waarden kustwateren en grote rivieren*. Tech. Rep. 1207509-000, Deltares. 12
- Dillingh, D., B. Fedor and J. de Ronde, 2010. *Definitie zeespiegelstijging voor bepaling supplementiebehoefte*. Tech. Rep. 1201993–002, Deltares. 11, 12, 32, 42, 44
- Domingues, R., G. Goni, M. Baringer and D. Volkov, 2018. "What Caused the Accelerated Sea Level Changes Along the U.S. East Coast During 2010–2015?" *Geophysical Research Letters* 45 (24): 13,367–13,376. URL <https://doi.org/10.1029/2018GL081183>. 71



- Donchyts, G., F. Baart, H. Winsemius, N. Gorelick, J. Kwadijk and N. van de Giesen, 2016. "Earth's surface water change over the past 30 years." *Nature Climate Change* 6: 810 EP –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3111>. 20
- Doodson, A. T., 1921. "The harmonic development of the tide-generating potential." *Proceedings of the Royal Society of London Series A-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 100 (704): 305–329. URL <http://www.jstor.org/stable/93989>. 25
- Douglas, B. C., 2001. "Sea level change in the era of the recording tide gauge." *Sea level rise: history and consequences* 75: 37–64. 48
- Dutton, A., A. E. Carlson, A. J. Long, G. A. Milne, P. U. Clark, R. DeConto, B. P. Horton, S. Rahmstorf and M. E. Raymo, 2015. "Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods." *Science* 349 (6244). URL <http://science.sciencemag.org/content/349/6244/aaa4019>. 18
- Eilers, P. H., 2003. "A perfect smoother." *Analytical chemistry* 75 (14): 3631–3636. 13
- Emeis, K.-C., J. van Beusekom, U. Callies, R. Ebinghaus, A. Kannen, G. Kraus, I. Kröncke, H. Lenhart, I. Lorkowski, V. Matthias, C. Möllmann, J. Pätsch, M. Scharfe, H. Thomas, R. Weisse and E. Zorita, 2015. "The North Sea — A shelf sea in the Anthropocene." *Journal of Marine Systems* 141: 18 – 33. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924796314000724>, biogeochemistry-ecosystem interaction on changing continental margins in the Anthropocene. 18
- Ericson, J. P., C. J. Vörösmarty, S. L. Dingman, L. G. Ward and M. Meybeck, 2006. "Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications." *Global and Planetary Change* 50 (1): 63–82. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818105001827>. 26
- Fetterer, F., K. Knowles, W. Meier and M. Savoie, 2017. "Sea ice index version 3." URL <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>. 21
- Frederikse, T., S. Jevrejeva, R. E. Riva and S. Dangendorf, 2018. "A consistent sea-level reconstruction and its budget on basin and global scales over 1958–2014." *Journal of Climate* 31 (3): 1267–1280. 61
- Frederikse, T., R. Riva, C. Slobbe, T. Broerse and M. Verlaan, 2016. "Estimating decadal variability in sea level from tide gauge records: An application to the North Sea." *Journal of Geophysical Research: Oceans* pages n/a–n/a. URL <http://dx.doi.org/10.1002/2015JC011174>. 47, 71
- Fretwell, P., H. D. Pritchard, D. G. Vaughan, J. L. Bamber, N. E. Barrand, R. Bell, C. Bianchi, R. G. Bingham, D. D. Blankenship, G. Casassa, G. Catania, D. Callens, H. Conway, A. J. Cook, H. F. J. Corr, D. Damaske, V. Damm, F. Ferraccioli, R. Forsberg, S. Fujita, Y. Gim, P. Gogineni, J. A. Griggs, R. C. A. Hindmarsh, P. Holmlund, J. W. Holt, R. W. Jacobel, A. Jenkins, W. Jokat, T. Jordan, E. C. King, J. Kohler, W. Krabill, M. Riger-Kusk, K. A. Langlely, G. Leitchenkov, C. Leuschen, B. P. Luyendyk, K. Matsuoka, J. Mouginot, F. O. Nitsche, Y. Nogi, O. A. Nost, S. V. Popov, E. Rignot, D. M. Rippin, A. Rivera, J. Roberts, N. Ross, M. J. Siegert, A. M. Smith, D. Steinhage, M. Studinger, B. Sun, B. K. Tinto, B. C. Welch, D. Wilson, D. A. Young, C. Xiangbin and A. Zirizzotti, 2013. "Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica." *The Cryosphere* 7 (1): 375–393. URL <https://www.the-cryosphere.net/7/375/2013/>. 20

- Gardner, A. S., G. Moholdt, J. G. Cogley, B. Wouters, A. A. Arendt, J. Wahr, E. Berthier, R. Hock, W. T. Pfeffer, G. Kaser, S. R. M. Ligtenberg, T. Bolch, M. J. Sharp, J. O. Hagen, M. R. van den Broeke and F. Paul, 2013. “A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009.” *Science* 340 (6134): 852–857. URL <http://science.sciencemag.org/content/340/6134/852>. 20
- Garner, A. J., J. L. Weiss, A. Parris, R. E. Kopp, R. M. Horton, J. T. Overpeck and B. P. Horton, 2018. “Evolution of 21st Century Sea Level Rise Projections.” *Earth’s Future* 0 (0). URL <https://doi.org/10.1029/2018EF000991>. 67, 74
- Gebraad, A. W. and M. E. Philippart, 1998. *The Dutch Continental Shelf Model, DCSM98: calibration using altimeter data*. Werkdocument RIKZ/OS- 98.121x, RIKZ. In Dutch. 71
- Gehrels, W. R. and P. L. Woodworth, 2013. “When did modern rates of sea-level rise start?” *Global and Planetary Change* 100: 263 – 277. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818112002093>. 18
- Haasnoot, M., S. van ’t Klooster and J. van Alphen, 2018. “Designing a monitoring system to detect signals to adapt to uncertain climate change.” *Global Environmental Change* 52: 273–285. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937801830445X>. 67
- Hansen, J. M., T. Aagaard and A. Kuijpers, 2016. “Reply to Schmith, T.; Thejll, P., and Nielsen, J.W., 2016. Discussion of Hansen, J.M.; Aagaard, T., and Kuijpers, A., 2015. Sea-Level Forcing by Synchronization of 56- and 74-Year Oscillations with the Moon’s Nodal Tide on the Northwest European Shelf (Eastern North Sea to Central Baltic Sea). *Journal of Coastal Research*, 31(5), 1041–1056. *Journal of Coastal Research*, 32(2), 452–455.” *Journal of Coastal Research* pages 456–459. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-15A-00004.1>. 25
- Hay, C. C., E. Morrow, R. E. Kopp and J. X. Mitrovica, 2015. “Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise.” *Nature* advance online publication: –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature14093>. 61
- Hijma, M. and H. Kooi, 2017. *Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens*. Tech. Rep. 11200538-008, Deltares. 26, 28
- , 2018. *Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2)*. Tech. Rep. 11202190-001-ZKS-0001, Deltares. 26, 29, 41, 42, 58
- Hollebrandse, F. A., 2005. *Temporal development of the tidal range in the southern North Sea*. Master’s thesis, Delft University of Technology. 71
- Houston, J. R. and R. G. Dean, 2011. “Sea-Level Acceleration Based on U.S. Tide Gauges and Extensions of Previous Global-Gauge Analyses.” *Journal of Coastal Research* pages 409–417. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-10-00157.1>. 63
- Hsu, C.-W. and I. Velicogna, 2017. “Detection of sea level fingerprints derived from GRACE gravity data.” *Geophysical Research Letters* 44 (17): 8953–8961. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017GL074070>. 23
- Huang, B., P. W. Thorne, V. F. Banzon, T. Boyer, G. Chepurin, J. H. Lawrimore, M. J. Menne, T. M. Smith, R. S. Vose and H.-M. Zhang, 2017. “Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons.” *Journal of Climate* 30 (20): 8179–8205. 18

- Hurk, B. van den, P. Siegmund, A. K. Tank, J. Attema, A. Bakker, J. Beersma, J. Bessembinder, R. Boers, T. Brandsma, H. van den Brink, S. Drijfhout, H. Eskes, R. Haarsma *et al.*, 2014. *KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century—A Netherlands perspective*. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. 22, 59, 60, 61, 67
- Jayne, S. R., D. Roemmich, N. Zilberman, S. C. Riser, K. S. Johnson, G. C. Johnson and S. R. Piotrowicz, 2017. “The Argo Program: Present and Future.” *Oceanography* 30. URL <https://doi.org/10.5670/oceanog.2017.213>. 20
- Jevrejeva, S., J. Moore, A. Grinsted, A. Matthews and G. Spada, 2014. “Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807.” *Global and Planetary Change* 113 (0): 11 – 22. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818113002750>. 49, 63, 64
- Jong, H. de, 1973. *Bodemdaling veroorzaakt door aardgaswinningen in de provincie Groningen*. Tech. rep., Rijkswaterstaat. 42, 44, 58
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen *et al.*, 1996. “The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project.” *Bulletin of the American meteorological Society* 77 (3): 437–472. 50
- Kemp, A. C., B. P. Horton, J. P. Donnelly, M. E. Mann, M. Vermeer and S. Rahmstorf, 2011. “Climate related sea-level variations over the past two millennia.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (27): 11017–11022. URL <http://www.pnas.org/content/108/27/11017>. 18
- Koningsveld, M. van, M. A. Davidson and D. A. Huntley, 2005. “Matching Science with Coastal Management Needs: The Search for Appropriate Coastal State Indicators.” *Journal of Coastal Research* pages 399–411. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/03-0076.1>. 11
- Koningsveld, M. van and J. P. M. Mulder, 2004. “Sustainable Coastal Policy Developments in The Netherlands. A Systematic Approach Revealed.” *Journal of Coastal Research* pages 375–385. URL [http://dx.doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)020\[0375:SCPDIT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.2112/1551-5036(2004)020[0375:SCPDIT]2.0.CO;2). 12, 67
- Kopp, R. E., F. J. Simons, J. X. Mitrovica, A. C. Maloof and M. Oppenheimer, 2009. “Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage.” *Nature* 462: 863 EP –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature08686>. 18
- Kroon, I., 2016. *Actualisering beleidsscenario zeespiegelstijging voor delfstofwinning onder de Waddenzee*. Advies AGE 16-10.066, TNO. 32, 33
- Lambeck, K., H. Rouby, A. Purcell, Y. Sun and M. Sambridge, 2014. “Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (43): 15296–15303. URL <https://www.pnas.org/content/111/43/15296>. 19
- Libby, W. F., 1946. “Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation.” *Phys. Rev.* 69: 671–672. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.69.671.2>. 18
- Liu, Y., A. H. Weerts, M. Clark, H.-J. Hendricks Franssen, S. Kumar, H. Moradkhani, D.-J. Seo, D. Schwanenberg, P. Smith, A. I. J. M. van Dijk, N. van Velzen, M. He, H. Lee, S. J. Noh, O. Rakovec and P. Restrepo, 2012. “Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities.” *Hydrology and Earth System Sciences*

- 16 (10): 3863–3887. URL <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3863/2012/>. 75
- Llovel, W., J. K. Willis, F. W. Landerer and I. Fukumori, 2014. “Deep-ocean contribution to sea level and energy budget not detectable over the past decade.” *Nature Climate Change* 4: 1031 EP –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2387>. 16, 20
- McCarthy, G. D., I. D. Haigh, J. J. M. Hirschi, J. P. Grist and D. A. Smeed, 2015. “Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations.” *Nature* 521: 508 EP –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature14491>. 24
- McKay, N. P., J. T. Overpeck and B. L. Otto-Bliesner, 2011. “The role of ocean thermal expansion in Last Interglacial sea level rise.” *Geophysical Research Letters* 38 (14). URL <https://doi.org/10.1029/2011GL048280>. 18
- Mercer, J., 1978. “West Antarctic ice sheet and CO<sub>2</sub> greenhouse effect: A threat of disaster.” *Nature* 271 (5643): 321–325. 22
- Milieu, M. v. Infrastructuur en, 2016. “Regeling van de Minister van Infrastructuur en Milieu, van 2 december 2016, nr. IENM/BSK-2016/283517, ter uitvoering van de artikelen 2.3, eerste lid, en 2.12, vierde lid, van de Waterwet, houdende regels voor het bepalen van de hydraulische belasting en de sterkte en procedurele regels voor de beoordeling van de veiligheid van primaire waterkeringen (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017).” Regeling. 34
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken, 2013. *Deltaprogramma 2014: Werk aan de delta*. Tech. rep., Deltaprogramma Kust. 11
- , 2014. *Deltaprogramma 2015: Werk aan de delta*. Tech. rep., Deltaprogramma Kust. 11
- Mooij, R. de and P. Tang, 2003. *Four futures of Europe*. CPB The Hague. 59
- Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant and T. J. Wilbanks, 2010. “The next generation of scenarios for climate change research and assessment.” *Nature* 463 (7282): 747–756. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>. 59
- Munk, W., M. Dzieciuch and S. Jayne, 2002. “Millennial Climate Variability: Is There a Tidal Connection?” *Journal of Climate* 15 (4): 370–385. URL [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0370:MCVITA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0370:MCVITA>2.0.CO;2). 25
- Nerem, R. S., B. D. Beckley, J. T. Fasullo, B. D. Hamlington, D. Masters and G. T. Mitchum, 2018. “Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* URL <http://www.pnas.org/content/early/2018/02/06/1717312115>. 68
- Nutley, S. M., P. C. Smith and H. T. Davies, 2000. *What works?: Evidence-based policy and practice in public services*. Policy Press. 12
- Oppenheimer, M., B. C. O’Neill and M. Webster, 2008. “Negative learning.” *Climatic Change* 89 (1): 155–172. URL <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9405-1>. 74
- Pickard, G. L. and W. J. Emery, 2016. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Elsevier. 15

- Pickering, M. D., K. J. Horsburgh, J. R. Blundell, J. J. M. Hirschi, R. J. Nicholls, M. Verlaan and N. C. Wells, 2017. "The impact of future sea-level rise on the global tides." *Continental Shelf Research* 142: 50–68. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434316304824>. 25
- Popper, K., 2014. *Conjectures and refutations: The growth of scientific knowledge*. routledge. 69
- Portman, M. E., L. S. Esteves, X. Q. Le and A. Z. Khan, 2012. "Improving integration for integrated coastal zone management: An eight country study." *Science of The Total Environment* 439: 194–201. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712012077>. 12
- Purkey, S. G. and G. C. Johnson, 2010. "Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets." *Journal of Climate* 23 (23): 6336–6351. URL <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3682.1>. 20
- Rijkswaterstaat, D.-G., 2000. *3e Kustnota: Traditie, trends en toekomst*. Tech. rep., Ministerie van Verkeer and Rijkswaterstaat en Waterstaat. 11
- Roemmich, D. and J. Gilson, 2009. "The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program." *Progress in Oceanography* 82 (2): 81 – 100. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661109000160>. 20
- Ronde, J. de, 2008. *Toekomstige langjarige suppletiebehoefte*. Tech. Rep. Z4582.24, Deltares. 11
- Ronde, J. de, F. Baart, C. Katsman and V. Vuijk, 2014. *Zeespiegelmonitor*. Tech. Rep. 1208712–000, Deltares, HKV en KNMI. 12, 13, 32
- Rutte, M. P. M., 2016. "Toespraak minister-president Rutte tijdens het trade dinner in Seoul." URL <https://www.rijksoverheid.nl/regering/bewindspersonen/mark-rutte/documenten/toespraken/2016/09/27/toespraak-minister-president-rutte-tijdens-het-trade-dinner-in-seoul>. 35, 70
- , 2017. "Korte toespraak minister-president Rutte bij het High Level Panel on Water in New York." URL <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/toespraken/2017/09/21/korte-toespraak-minister-president-rutte-bij-het-high-level-panel-on-water-in-new-york>. 70
- Salvatier, J., T. V. Wiecki, C. Fonnesbeck and C. Elkan, 2016. "Probabilistic programming in Python using PyMC3." *PeerJ Computer Science* 2: e55. URL <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.55>. 50
- Samenwerkingsverband Maasvlakte 2, 1998. *Ontwerpnota Maasvlakte 2 : rapportage ontwerponderzoek fase 1B*. Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 Varianten, Rotterdam. 33, 34
- Sanderson, I., 2002. "Evaluation, Policy Learning and Evidence-Based Policy Making." *Public Administration* 80 (1): 1–22. URL <https://doi.org/10.1111/1467-9299.00292>. 12
- Scharroo, R., J. L. Lillibridge, W. H. F. Smith and E. J. O. Schrama, 2004. "Cross-Calibration and Long-Term Monitoring of the Microwave Radiometers of ERS, TOPEX, GFO, Jason, and Envisat." *Marine Geodesy* 27 (1-2): 279–297. URL <https://doi.org/10.1080/01490410490465265>. 46



- Schlesinger, M. E. and N. Ramankutty, 1994. "An oscillation in the global climate system of period 65–70 years." *Nature* 367: 723 EP –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/367723a0>. 23
- Shepard, F. P. and H. E. Suess, 1956. "Rate of Postglacial Rise of Sea Level." *Science* 123 (3207): 1082–1083. URL <http://science.sciencemag.org/content/123/3207/1082.2>. 18
- Slangen, A. B. A., C. A. Katsman, R. S. W. van de Wal, L. L. A. Vermeersen and R. E. M. Riva, 2012. "Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios." *Climate Dynamics* 38 (5): 1191–1209. URL <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1057-6>. 22
- Slobbe, D., R. Klees, M. Verlaan, L. Dorst and H. Gerritsen, 2013. "Lowest astronomical tide in the North Sea derived from a vertically referenced shallow water model, and an assessment of its suggested sense of safety." *Marine Geodesy* 36 (1): 31–71. 43
- Smeed, D., G. McCarthy, S. Cunningham, E. Frajka-Williams, D. Rayner, W. Johns, C. Meinen, M. Baringer, B. Moat, A. Duchez *et al.*, 2014. "Observed decline of the Atlantic meridional overturning circulation 2004–2012." *Ocean Science* 10 (1): 29–38. 24
- Stammer, D., A. Cazenave, R. M. Ponte and M. E. Tamisiea, 2013. "Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes." *Annual Review of Marine Science* 5 (1): 21–46. URL <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172406>, pMID: 22809188. 22
- Sterlini, P., D. Le Bars, H. de Vries and N. Ridder, 2017. "Understanding the spatial variation of sea level rise in the North Sea using satellite altimetry." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122 (8): 6498–6511. URL <https://doi.org/10.1002/2017JC012907>. 67
- 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, 2013a. *Climate change 2013: The physical science basis*. Tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change. 15, 59
- Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley *et al.*, 2013b. *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*. Tech. rep., Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat/Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC. 20, 49
- Talley, L. D., R. A. Feely, B. M. Sloyan, R. Wanninkhof, M. O. Baringer, J. L. Bullister, C. A. Carlson, S. C. Doney, R. A. Fine, E. Firing, N. Gruber, D. A. Hansell, M. Ishii, G. C. Johnson, K. Katsumata, R. M. Key, M. Kramp, C. Langdon, A. M. Macdonald, J. T. Mathis, E. L. McDonagh, S. Mecking, F. J. Millero, C. W. Mordy, T. Nakano, C. L. Sabine, W. M. Smetnie, J. H. Swift, T. Tanhua, A. M. Thurnherr, M. J. Warner and J. Z. Zhang, 2016. "Changes in Ocean Heat, Carbon Content, and Ventilation: A Review of the First Decade of GO-SHIP Global Repeat Hydrography." *Annual Review of Marine Science* 8 (1): 185–215. URL <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-052915-100829>. 20
- Team, T. I., 2018. "Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017." *Nature* 558 (7709): 219–222. URL <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>. 21
- Teng, J., A. J. Jakeman, J. Vaze, B. F. W. Croke, D. Dutta and S. Kim, 2017. "Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis." *Environmental Modelling & Software* 90: 201–216. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216310040>. 75

- Veen, J. van, 1945. “Bestaat er een geologische bodemdaling te Amsterdam sedert 1700.” *Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap* 2 (62): 2–36. In Dutch. 18, 26, 31, 49
- , 1954. “Tide-gauges, subsidence-gauges and flood-stones in the Netherlands.” *Geol. Mijnbouw* . 31
- Verkeer en Waterstaat, 2008. *Nationaal Waterplan*. Tech. rep., Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. 11
- Vermeersen, B. L. A., A. B. A. Slangen, T. Gerkema, F. Baart, K. M. Cohen, S. Dangendorf, M. Duran-Matute, T. Frederikse, A. Grinsted, M. P. Hijma, S. Jevrejeva, P. Kiden, M. Kleinhedenbrink, E. W. Meijles, M. D. Palmer, R. Rietbroek, R. E. M. Riva, E. Schulz, D. C. Slobbe, M. J. R. Simpson, P. Sterlini, P. Stocchi, R. S. W. van de Wal and M. van der Wegen, 2018. “Sea-level change in the Dutch Wadden Sea.” *Netherlands Journal of Geosciences* 97 (3): 79–127. URL <https://www.cambridge.org/core/article/sealevel-change-in-the-dutch-wadden-sea/A5B7C0A4ACC554F437C672CCE7FBBC45>. 23
- Vignudelli, S., A. G. Kostianoy, P. Cipollini and J. Benveniste, 2011. *Coastal altimetry*. Springer Science & Business Media. 46
- Visser, H., S. Dangendorf and A. C. Petersen, 2015. “A review of trend models applied to sea level data with reference to the “acceleration-deceleration debate”.” *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120 (6): 3873–3895. URL <https://doi.org/10.1002/2015JC010716>. 47, 48, 51
- Voosen, P., 2017. “Deep Pacific cooled by ‘little ice age’ waters.” *Science* 358 (6370): 1515–1516. URL <http://science.sciencemag.org/content/358/6370/1515>. 18
- VROM, 2004. *Nota Ruimte – Ruimte voor Ontwikkeling*. Tech. rep., Ministeries van VROM, LNV, VenW en EZ. PKB Nationaal Ruimtelijk Beleid. 11
- Wada, Y., L. P. H. van Beek, C. M. van Kempen, J. W. T. M. Reckman, S. Vasak and M. F. P. Bierkens, 2010. “Global depletion of groundwater resources.” *Geophysical Research Letters* 37 (20). URL <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>. 20
- Wada, Y., M. F. P. Bierkens, A. de Roo, P. A. Dirmeyer, J. S. Famiglietti, N. Hanasaki, M. Konar, J. Liu, H. Müller Schmied, T. Oki, Y. Pokhrel, M. Sivapalan, T. J. Troy, A. I. J. M. van Dijk, T. van Emmerik, M. H. J. Van Huijgevoort, H. A. J. Van Lanen, C. J. Vörösmarty, N. Wanders and H. Wheeler, 2017. “Human–water interface in hydrological modelling: current status and future directions.” *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (8): 4169–4193. URL <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/4169/2017/>. 20
- Wahl, T., I. D. Haigh, P. L. Woodworth, F. Albrecht, D. Dillingh, J. Jensen, R. J. Nicholls, R. Weisse and G. Wöppelmann, 2013. “Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present.” *Earth-Science Reviews* 124: 51–67. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825213000937>. 61
- Watkins, M. M., D. N. Wiese, D.-N. Yuan, C. Boening and F. W. Landerer, 2015. “Improved methods for observing Earth’s time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons.” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120 (4): 2648–2671. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JB011547>. 16, 21

- Watson, C. S., N. J. White, J. A. Church, M. A. King, R. J. Burgette and B. Legresy, 2015. "Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era." *Nature Climate Change* 5: 565 EP –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2635>. 64
- 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. 47
- Weele, P. I. van der, 1971. *De geschiedenis van het NAP*. Rijkscommissie voor Geodesie. 42, 43
- Wemelsfelder, P. J., 1958. *Invoering van de Nulpalen*. Tech. rep., Rijkswaterstaat. 43
- Woodworth, P. L., N. J. White, S. Jevrejeva, S. J. Holgate, J. A. Church and W. R. Gehrels, 2009. "Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales." *International Journal of Climatology* 29 (6): 777–789. 54
- Zeileis, A., 2004. "Econometric Computing with HC and HAC Covariance Matrix Estimators." *Journal of Statistical Software, Articles* 11 (10): 1–17. URL <https://www.jstatsoft.org/v011/i10>. 65
- Zlotnicki, V., Z. Qu and J. Willis, 2016. "JPL MEaSURES Gridded Sea Surface Height Anomalies Version 1609." Dataset. URL <http://dx.doi.org/10.5067/SLREF-CDRV1>. 16, 22, 44





## Acroniemen

<b>AR</b>	Autoregressie
<b>Argo</b>	Argo, vernoemd naar schip uit de Griekse mythologie
<b>AGRS</b>	Actief GNSS Referentie Systeem
<b>AHN</b>	Actueel Hoogtebestand Nederland
<b>AIC</b>	Akaike Informatie Criterium
<b>AMO</b>	Atlantic Multidecadal Oscillation
<b>AVISO</b>	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data
<b>BKL</b>	Basis KustLijn
<b>BRK</b>	Basisregistratie Kadaster
<b>BGT</b>	Basisregistratie Grootchalige Topografie
<b>BMA</b>	Bayesian Model Averaging
<b>CIV</b>	Centrale Informatievoorziening
<b>CBS</b>	Centraal Bureau voor de Statistiek
<b>CPB</b>	Centraal Plan Bureau
<b>CSIRO</b>	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
<b>DCSM</b>	Dutch Continental Shelf Model
<b>DG</b>	Directoraat-generaal
<b>DNM</b>	Digitale Niveau Meter
<b>EGM2008</b>	Earth Gravitational Model 2008
<b>EGM96</b>	Earth Gravitational Model 1996
<b>ECCO</b>	Estimating the Circulation and Climate of the Ocean
<b>ERSST</b>	Extended Reconstructed Sea Surface Temperature
<b>ETRS89</b>	European Terrestrial Reference System 1989
<b>ENSO</b>	El Niño–Southern Oscillation
<b>EZK</b>	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
<b>GIA</b>	Glacial Isostatic Adjustment, postglaciale opheffing
<b>GLOSSIS</b>	Global Storm Surge Forecasting and Information System
<b>GLM</b>	Generalized Linear Model

<b>GMSL</b>	Global Mean Sea Level, globaal gemiddeld zeeniveau
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GODAS</b>	Global Ocean Data Assimilation System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GRACE</b>	Gravity Recovery and Climate Experiment
<b>GRACE-FO</b>	Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on
<b>GTSM</b>	Global Tidal Surge Model
<b>GTSR</b>	Global Tidal Surge Reanalysis
<b>HAC</b>	Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent
<b>HKV</b>	HKV lijn in water
<b>HHNK</b>	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
<b>IB</b>	Inverse Barometer
<b>IHM</b>	InformatieHuis Marien
<b>IHO</b>	International Hydrographic Organization
<b>IHW</b>	InformatieHuis Water
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>IV</b>	Informatie Voorziening
<b>laaS</b>	Infrastructure as a Service
<b>IenW</b>	Ministerie van Infrastructuur en Water
<b>IOOS</b>	Integrated Ocean Observing System
<b>JASON</b>	Joint Altimetry Satellite Oceanography Network
<b>K1</b>	Lunar diurnal constituent
<b>KNMI</b>	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
<b>KPP</b>	Kennis voor Primaire Processen
<b>L2</b>	Smaller lunar elliptic semidiurnal constituent
<b>LAT</b>	Lowest Astronomical Tide
<b>LMW</b>	Landelijk Meetnet Water
<b>LOESS</b>	LOcal regrESSion (a later generalization of LOWESS)
<b>LOWESS</b>	Locally weighted scatterplot smoothing
<b>LSTM</b>	Long Short-Term Memory
<b>M2</b>	Principal lunar semidiurnal constituent

<b>M4</b>	Shallow water overtides of principal lunar constituent
<b>MAP</b>	Maximum A Posteriori
<b>MCMC</b>	Markov chain Monte Carlo
<b>MorphAn</b>	Morphological Analysis
<b>MWP</b>	Meltwater Pulse
<b>MDN</b>	Mixture density networks
<b>MN4</b>	Shallow water quarter diurnal constituent
<b>MS4</b>	Shallow water quarter diurnal constituent
<b>MSL</b>	Mean Sea Level
<b>MSLA</b>	Monthly mean climatology maps of Sea Level Anomalies
<b>MLLW</b>	Mean Lower Low Water
<b>MLW</b>	Mean Low Water
<b>MU2</b>	Variational constituent
<b>N2</b>	Larger lunar elliptic semidiurnal constituent
<b>NAP</b>	Normaal Amsterdams Peil
<b>NAO</b>	North Atlantic Oscillation
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NCAR</b>	National Center for Atmospheric Research
<b>NCEP</b>	National Centers for Environmental Prediction
<b>NCG</b>	Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-informatica
<b>NLGeo2004</b>	Nederlands Geoïdemodel 2004
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>NWP</b>	Nationaal Water Plan
<b>O1</b>	Lunar diurnal constituent
<b>OGC</b>	Open Geospatial Consortium
<b>PGB</b>	Postglaciale bodembeweging
<b>PBL</b>	Planbureau voor de Leefomgeving
<b>PSMSL</b>	Permanent Service for Mean Sea Level
<b>PVDA</b>	Partij van de Arbeid
<b>PaaS</b>	Platform as a Service
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathway

<b>RD</b>	Rijksdriehoeksstelsel
<b>ROFI</b>	Region Of Freshwater Influence
<b>RLR</b>	Revised Local Reference
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>RWS</b>	Rijkswaterstaat
<b>S2</b>	Principal solar semidiurnal constituent
<b>SaaS</b>	Software as a Service
<b>SLF</b>	Sea Level Fingerprint
<b>STL</b>	Seasonal Decomposition of Time Series by Loess
<b>TGBM</b>	Tide Gauge Benchmark
<b>TNO</b>	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
<b>WBI</b>	Wettelijke BeoordelingsInstrumentarium
<b>WCRP</b>	World Climate Research Programme
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984

## **10 Bijlagen**

### **10.1 Reproduceerbaarheid zeespiegelmonitor**

# Memo



**Aan**  
Fedor Baart, Deltares

**Datum**  
25 oktober 2017  
**Van**  
Pieter van Gelder

**Kenmerk**  
Repr. statistische modellen  
**Doorkiesnummer**  
+31(0)15 2786544

**Aantal pagina's**  
7  
**E-mail**  
[p.h.a.j.m.vangelder@tudelft.nl](mailto:p.h.a.j.m.vangelder@tudelft.nl)

**Onderwerp**  
Reproduceerbaarheid van statistische modellen voor 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, scenario's, en de probabilistische inschattingen hiervan.

In dit deelonderzoek concentreren we ons op de reproduceerbaarheid van de statistische modellen zoals deze gebruikt worden in het zeespiegeldossier. Deze memo sluit aan bij de drie memo's over de reproduceerbaarheid van metingen, de reproduceerbaarheid van de fysica, en de bepaling van de huidige zeespiegel.

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.

## 2 Vraagstelling

De vraag waarop in dit memo antwoord gegeven wordt, luidt: Hoe goed is de reproduceerbaarheid van de door Deltares bepaalde zeespiegelprojecties en onzekerheidsbanden voor de Noordzee tot aan het jaar 2100, en geef daarbij een oordeel op: i) Mate van documentatie, ii) Traceerbaarheid, iii) Overdraagbaarheid, iv) Herhaalbaarheid, v) Herleidbaarheid.

### 3 Onderzoeksmethode

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

- Fedor Baart, hoofdverantwoordelijk voor het opstellen van de zeespiegelmonitor (interview 19 juli 2017).
- Robin Nicolai, verbonden aan HKV Lijn in Water, verantwoordelijk voor de operationele statistische analyses van de zeespiegel en de gevolgen daarvan voor het kustbeleid (interview 18 juli 2017).

Reproduceerbaarheid wordt onderzocht door de volgende aspecten te onderzoeken: i) Mate van documentatie, ii) Traceerbaarheid, iii) Overdraagbaarheid, iv) Herhaalbaarheid, v) Herleidbaarheid.

### 4 Resultaten

Bij het opstellen van de statistische modellen voor jaargemiddelde zeewaterstanden en de projecties daarvan naar de toekomst wordt uitgegaan van waargenomen zeespiegelmetingen uit het verleden. Daarbij worden de volgende aspecten meegenomen:

- Invloed van de wind op de waargenomen zeewaterstanden, zoals geconstateerd door De Ronde et al. (2013);
- Inklinking van de bodem; de projecties geven hiermee een beeld van de kansverdelingen van de relatieve verandering van zeeniveau langs de Nederlandse kust, zoals beschreven in Dillingh et al. (2010);
- Niet-lineariteiten in de zeespiegelstijging, waaronder het sinusoidale getij (18,6 jarige cyclus) en de kwadratische invloed met de jaargemiddelde windsnelheid en jaargemiddelde windrichting;
- Een hogere weging aan recente data in vergelijking met oudere waarnemingen
- Een weging met de voorspellingen uit een fysisch gebaseerd klimaat model, waarin processen zijn meegenomen t.g.v. temperatuursverandering en de invloed daarvan op het oceaanniveau door uitzetting van water en smelting van ijskappen, veranderingen van de zeespiegel die samenhangen met aanpassingen in de grootschalige circulatie en verandering in de luchtdruk aan het oppervlak en tot slot elastische deformatie en aanpassingen van het zwaartekrachtsveld ten gevolge van het smelten van landijs. De combinatie van beide modellen leiden tot een meer betrouwbare en meer valide schatting van de toekomstige zeespiegelstijging.



*Tabel: overzicht databronnen voor de zeespiegelprojecties.*

Databron	Openbaar	Online beschikbaar	Opmerkingen
PSMSL zeewaterstanden van de 6 hoofdstations	ja	Ja via: <a href="http://www.psm.org/">http://www.psm.org/</a>	NAP correctie is toegepast. Verschillen met RWS data zijn geconstateerd.
Luchtdrukken uit de National Centers for Environmental Prediction NCEP/NCAR heranalyses	ja	Ja via: <a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html">https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html</a>	Luchtdrukken voor 1948 niet beschikbaar.
Jaargemiddelde gekwadrateerde windsnelheid en –richting op basis van de NCEP/NCAR heranalyses	ja	Ja via: <a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html">https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html</a>	Winddata voor 1948 niet beschikbaar.
Jaargemiddelde waterstanden station Amsterdam (vanaf 1700)	na te gaan	na te gaan	

### Mate van documentatie

De methode is goed gedocumenteerd in technische rapporten van Deltares. Rapporten (368707, 368722, 237918) zijn digitaal te downloaden via de Hydrotheek van <http://library.wur.nl/>

Er wordt uitgegaan van bovenstaande databronnen.

De modelkeuze en de keuze voor een niet-parametrische smoothing methode, bijbehorende span en wegingsfunctie voor recente waarnemingen zijn beargumenteerd. De schatting van de modelparameters en de smoothing gebeuren met het statistisch pakket R en Python.

De keuze tot het combineren van het fysisch model (De Vries et al., 2014) en het statistische model zoals beschreven in Baart, 2015, evenals de methoden om de modellen te combineren met een Bayesiaanse modelweging is goed gedocumenteerd.

### Traceerbaarheid

De zeespiegelprojecties komen tot stand door het uitvoeren van de beschreven methode op de aangegeven brondata, en staan eveneens (deels) beschreven incl. source code en commentaarvelden op:

<https://github.com/openearth/sealevel/blob/master/notebooks/dutch-monitor.ipynb>

In De Ronde et al. (2013) wordt verwezen naar Deltares (2010) dat de NAP-correctie (vanaf 2005) is doorgevoerd in de Nederlandse tijdreeksen met NAP als referentieniveau.

Tevens speelt er een mogelijke trendbreuk bij 1993 bij de overstap naar TOPEX/Poseidon metingen.

Om een homogene reeks te verkrijgen moet deze weer ongedaan gemaakt worden (Deltares, 2010), maar de aanpak hoe deze homogenisatie plaatsvindt kan in Deltares (2010) niet getraceerd worden. Naast een trendcorrectie dient er bij homogeniteit en stationariteit ook gelet te worden op heteroscedaciteit en mogelijke autocorrelaties in de data. Verdere details daarover zijn in de review niet teruggevonden. Homogeniteitsanalyses dienen zowel voor waterstanden als windsnelheden plaats te vinden.

Data over windsnelheden voor 1948 zijn niet beschikbaar. Deze worden in de modellering vervangen door een constante gemiddelde windsnelheid. De consequenties van een dergelijke aanname zijn verder niet onderzocht.

Het is traceerbaar hoe de kwaliteit van een statistisch model is beoordeeld. Dit is gebeurd aan de hand van AIC. Tevens is traceerbaar wat het resultaat was van de Durbin-Watson toets en de Jarque-Bera (JB) toets.

Het is traceerbaar hoe de weging van het fysische model met het statistische model heeft plaatsgevonden. Echter, de computer code is op de Github site niet achterhaald kunnen worden.

### **Overdraagbaarheid**

De overdraagbaarheid van de methode is goed. In de afgelopen jaren (sinds 2010) is de methode ontwikkeld en toegepast door:

ir. D. Dillingh (Deltares)  
dr. F. Baart (Deltares)  
ir. J.G. de Ronde (Deltares)  
dr.C.A.Katsman (KNMI & TUD)  
ir.V.Vuik (HKV)  
ir. R. Leander (Deltares),  
dr. H. de Vries (KNMI),  
dr. R. Nicolai (HKV)  
ir. M. van Hoek (HKV)  
ir. C. v.d. Vries (Deltares)  
dr. ir. H. v.d. Boogaerd (Deltares)  
ir. G. Rongen (HKV)

Meerdere personen zijn dus bekend met de methode. Opvallend is echter de afwezigheid van auteurs van het Ministerie van I&M / RWS. De publicaties over zeespiegelstijging zijn ook steeds met meerdere auteurs tot stand gekomen. De software code is verder open source en staat gedocumenteerd op de Github site, hoewel nadere toelichting, zoals bijv. een gedetailleerde handleiding, gewenst is. Zo kan de weging fysica vs. statistiek niet direct teruggevonden worden in de code.

Overdraagbaarheid, middels het ontwikkelen van open source model code en - data, is ook gerelateerd aan de inbedding in het universitaire onderwijs. Aan de TU Delft wordt aan de technische faculteiten nog relatief weinig onderwijs gegeven over samenwerking middels open source model code ontwikkeling. Een uitzondering is het onderwijs bij de

faculteit Lucht- en Ruimtevaart, waar in het 1<sup>e</sup> jaar het vak Programming & Scientific Computing in Python wordt gedoceerd. Aanbevolen wordt om dit ook bij andere faculteiten onder de aandacht te brengen, met name bij een faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

Tot slot, overdraagbaarheid naar het publiek is ook van belang. Het publiek zou middels overzichtelijke informatie toegang moeten hebben tot het zeespiegeldossier. Een rol die vanuit de overheid vervuld moet worden.

### Herhaalbaarheid

Om herhaalbaarheid te onderzoeken, zou de programmatuur door verschillende onderzoeksgroepen moeten worden gerund en de resultaten met elkaar moeten worden vergeleken, op eenzelfde manier als beschreven in de studie van Mathiesen et al. (1994). Dat valt echter buiten de scope van de onderliggende review.

De methodiek voor de bepaling van de statistische fits is op abstractie niveau de afgelopen jaren, sinds 2010, hetzelfde gebleven en inmiddels door verschillende personen toegepast. Er wordt wel aanbevolen om meerdere gevoeligheidsexperimenten uit te voeren om de mate van stabiliteit te bepalen. In de documentatie is slechts 1 gevoeligheidsanalyse aangetroffen, betreffende de locatiekeuze.

Het artikel Baart et al. (2012) is inmiddels 52x geciteerd in de wetenschappelijke literatuur, dat daarmee aangeeft dat de statistische methode 'omarmd' wordt door de international sea-level rise community.

### Herleidbaarheid (software en data)

De resultaten in de zeespiegelmonitor van Baart et al. 2015 zijn gebaseerd op een implementatie van de statistische methoden in *R* / *Python*. Deze code is publiek beschikbaar en in versiebeheer op Github.

De herkomst van de brondata is gedocumenteerd en de data is openbaar beschikbaar. Echter, Mattijn van Hoek (HKV) heeft een paired difference analysis RWS and PSMSL data uitgevoerd en concludeerde dat: "Numeric Monthly PSMSL data cannot be reproduced exactly using the RWS data available through their webservices. Certain validation and processing methods have been applied on the raw values before RWS has submitted their resampled monthly data to PSMSL".

*Tabel: verschillen zoals geconstateerd door M. van Hoek*

	IJMDBTHVN	VLISSGN	HOEKVHLD	DENHDR	DELFLZL	HARLGN
<b>absolute mean difference (cm)</b>	0.394272	0.245511	0.532790	0.130802	0.606863	0.143925
<b>absolute max difference (cm)</b>	126.800000	17.378134	44.345186	15.859767	41.565789	17.009375

## 5 Adviezen

Het oordeel over de i) Mate van documentatie, ii) Traceerbaarheid, iii) Overdraagbaarheid, iv) Herhaalbaarheid, v) Herleidbaarheid van de statistische modellen in de analyse van zeespiegelstijging is overall positief. Deltares heeft hiertoe belangrijke stappen voorwaarts gezet en Nederland kan hiermee als voorloper in de wereld worden aangemerkt.

Enkele malen is in de analyse op basis van face-validiteit (“wat oogt goed”) gekozen voor een specifieke methode (bijv. de keuze voor een lineaire LOESS, of de keuze voor het meenemen van de Amsterdam term). Wellicht dat hier op basis van data op andere locaties (Denemarken, Verenigd Koninkrijk), hindcasting en expert judgment met experts uit de internationale sea-level rise community meer onderbouwing voor kan worden gegeven.

Naast de bepaling van kansverdelingen voor jaargemiddelde zeewaterstanden, zijn de bepaling van kansverdelingen voor daggemiddelde zeewaterstanden en de bepaling van kansverdelingen voor jaarmaximale zeewaterstanden van belang voor het Nederlandse kustbeleid. Bij zeewaterstanden kan het dan zowel gaan om de daadwerkelijk gemeten waterstanden als om de (scheve) windopzetten, gecorrigeerd voor getij. We bevelen aan om voor deze variabelen een soortgelijke review uit te voeren wat betreft de scoring van de deelaspecten i) Mate van documentatie, ii) Traceerbaarheid, iii) Overdraagbaarheid, iv) Herhaalbaarheid, v) Herleidbaarheid.

De gevoeligheid van de variabelen  $t$ ,  $T_H$ ,  $N$ ,  $U^2\cos$ ,  $U^2\sin$ ,  $P$ ,  $NAO$  en  $Q$  volgen direct uit het regressiemodel, zoals gerapporteerd in De Ronde et al. (2014). De gevoeligheid van de locatiekeuze is onderzocht met een locatie dicht bij de Nederlandse kust: (lat,lon) = (54.2846°, 3.7500°). Deze wijziging leverde geen noemenswaardige verschillen op in berekende zeespiegelstijging en verklaarde variantie. Het wordt aanbevolen om meerdere gevoeligheidsanalyses uit te voeren en daarmee de robuustheid van de voorspellingen te onderzoeken, zoals de gevoeligheid van de grootte van het tijdsvenster, de keuze voor daggemiddelde of jaargemiddelde windsnelheden, etc.

De beschikbaarheid van alle source data, en de gedetailleerde commentaarregels op de code op <https://github.com/openearth/sealevel/tree/master/notebooks> wordt als zeer belangrijk ervaren. Dit stelt onderzoekers in staat om zorgvuldige (her)analyses uit te voeren, die zonder deze beschikbaarheid onmogelijk zouden zijn. Overweeg om alle model code, data en handleidingen beschikbaar te stellen via een site van Rijkswaterstaat. Bewaartermijnen van model code en data kunnen door de overheid worden vastgesteld.

Het zeespiegeldossier wordt naast zeespiegelstijging ook beheerst door bodeminklinking. Het vele modelleerwerk voor zeespiegelstijging staat in contrast met het weinige modelleerwerk voor bodemdaling. Aanbevolen wordt om statistische – en fysische modellen te ontwikkelen voor de projecties van bodeminklinking.

Universiteiten in Nederland en GTI's hanteren de Gedragscode Wetenschapsbeoefening met principes van goed wetenschappelijk onderwijs en onderzoek. De uitgangspunten zijn:

- eerlijkheid en zorgvuldigheid
- betrouwbaarheid
- controleerbaarheid

- onpartijdigheid
- onafhankelijkheid
- verantwoordelijkheid

De onderzoeksagenda zeespiegelmonitor (Baart 2014) geeft 'handen en voeten' aan deze gedragscode door met name de controleerbaarheid en betrouwbaarheid kritisch te bestuderen. De discussie hierover binnen de ingenieurswetenschappen loopt wellicht achter op de sociale wetenschappen. Binnen de ingenieurswetenschappen zijn ook verschillen te zien. De klimaatwereld loopt voor op de kustmorfologische wereld. De 'rivierenwereld' heeft ook nog een flinke slag te maken.

## 6 Referenties

Baart, Fedor, Robert Leander, John de Ronde, Hylke de Vries, Vincent Vuik, Robin Nicolai, (2015): Zeespiegelmonitor 2014. Deltares rapport 1209 426.202

Baart, F, PH Van Gelder, J De Ronde, M Van Koningsveld, B Wouters, 2012. The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates, *Journal of Coastal Research* 28 (2), 511-516.

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

De Ronde, J., F. Baart, C. Katsman and V. Vuik, 2013. Zeespiegelmonitor. Tech. Rep. 1208712-000, Deltares, HKV en KNMI.

Dillingh, D., B. Fedor and J. de Ronde, 2010. Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Tech. Rep. 1201993-002, Deltares.

Mathiesen , Martin, Yoshimi Goda , Peter J. Hawkes , Etienne Mansard , María Jesús Martín , Eric Peltier , Edward F. Thompson & Gerbrant Van Vledder, Recommended practice for extreme wave Analysis, *Journal of Hydraulic Research* 32(6):803-814 · November 1994.

Vries, H. de, C. Katsman and S. Drijfhout, 2014. "Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways." *Environmental Research Letters* 9 (11): 115007. URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=11/a=115007>.

## **10.2 Reproduceerbaarheid zeespiegelprojecties**

## Memo

**Aan**  
Jean-Marie Stam, RWS

**Datum**  
1 september 2017

**Kenmerk**  
11200541-001-ZKS-0005

**Aantal pagina's**  
7

**Van**  
Matthijs den Toom

**Doorkiesnummer**  
+31(0)88335 7937

**E-mail**  
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 uitvergroet). 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).

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

### **10.3 Reproduceerbaarheid zeespiegelmetingen**

## Memo

**Aan**  
Jean-Marie Stam, RWS

<b>Datum</b> 27 december 2016	<b>Kenmerk</b> 1230046-000-ZKS-0008	<b>Aantal pagina's</b> 7
<b>Van</b> Fedor Baart	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88335 8140	<b>E-mail</b> fedor.baart@deltares.nl

**Onderwerp**  
Reproduceerbaarheid zeespiegelmetingen

---

## 1 Inleiding

Dit onderzoek vindt plaats in aansluiting op de onderzoeksagenda zeespiegelmonitor. Veel beslissingen worden genomen op basis van de zeespiegelmetingen, berekeningen en voorspellingen. 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 met name op de reproduceerbaarheid.

De gebrek aan reproduceerbaarheid van gegevens is onder onderzoekers een hot item. De reproduceerbaarheids 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. Uit een onderzoek onder 1500 wetenschappers, gepubliceerd in Nature, blijkt dat 90% van mening is dat er een reproduceerbaarheids 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.

Ook bij de zeespiegelstanden speelt de beperkte reproduceerbaarheid regelmatig op. Van Veen (1945) vond de metingen uit Amsterdam onbruikbaar voor trendschattingen omdat op de gegevens oncontroleerbare correcties hadden plaatsgevonden. De Nederlandse gegevens zijn een tijd uitgesloten van de internationale database van de Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) omdat niet vast stond hoe het proces van meting tot jaargemiddelde was verlopen. Sinds het eenduidig corrigeren voor de NAP correctie (Dillingh et al., 2010) zijn de gegevens weer opgenomen.

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.

Deze memo richt zich op de reproduceerbaarheid van de metingen en de daaruit afgeleide jaargemiddelden. De reproduceerbaarheid van afgeleide waarden zoals de huidige en toekomstige zeespiegel worden in 2017 onderzocht.

## 2 Vraagstelling

Hoe goed is de reproduceerbaarheid van de jaargemiddelde zeespiegel? Dat is de vraagstelling die we in deze memo beantwoorden. We operationaliseren de reproduceerbaarheid door de volgende deelvragen te beantwoorden:

- Is de methode eenduidig beschreven?
- Is de indicator traceerbaar? Kunnen we het pad heen en terug volgen?
- Is de indicator overdraagbaar? Als de bepaling door een andere persoon wordt uitgevoerd, komt er dan hetzelfde uit?
- Is de indicator herhaalbaar? Als de indicator nogmaals wordt bepaald, komt er dan hetzelfde uit?
- Is de software herleidbaar? Zijn de versies en broncode bekend van de software waarmee de indicator bepaald is?
- Zijn de data herleidbaar? Is bekend met welke methode de gegevens zijn bepaald?

## 3 Onderzoeksmethode

De reproduceerbaarheid is onderzocht door de personen die bij Rijkswaterstaat aan deze onderdelen werken te interviewen. De volgende personen zijn benaderd voor een interview:

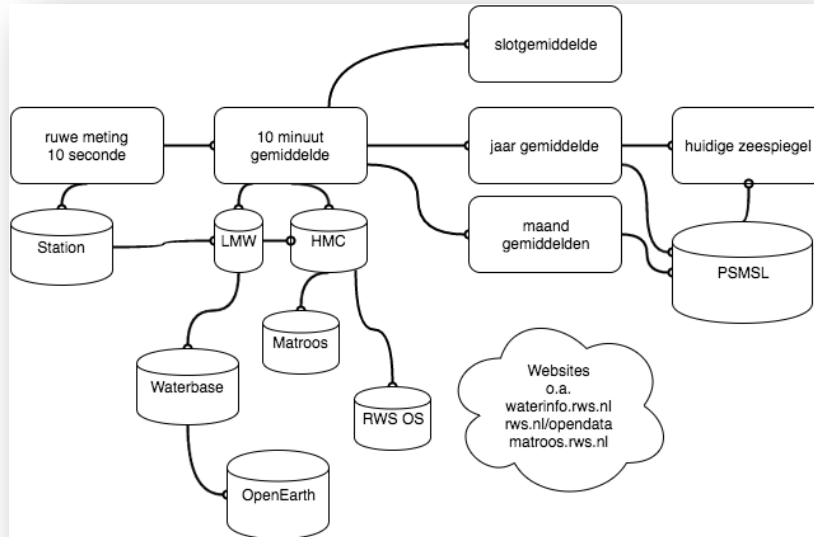
- Peter Heinen, Informatie manager water kwantiteit (interview: 2016-10-27)
- Koes Doekes (niet beschikbaar, kort telefonisch gesprek (2016-11-05))
- Hans van Zeijl, Coördinator Kwaliteit & configuratie voor Landelijk Meetnet Water (interview: 2016-11-22)

De geïnterviewden is gevraagd om het werkproces te beschrijven, met name over de bovenstaande aspecten van reproduceerbaarheid.

## 4 Resultaten

Het proces van ruwe metingen naar de "huidige zeespiegel" indicator volgt een aantal stappen. De stappen zijn schematisch weergegeven in onderstaande figuur. De afkortingen staan weergegeven in de acroniemen tabel.





## Normaal Amsterdams Peil

Het proces van metingen begint bij de "ruwe metingen" die op de getij stations plaatsvinden. De zogenaamde "hoofdstations" (Delfzijl, Harlingen, Den Helder, Vlissingen, IJmuiden en Hoek van Holland, zoals gedefinieerd in de Ronde (1984)) worden gebruikt in de bepaling van de "huidige zeespiegel" (Baart et al., 2015). Het station IJmuiden heeft een lagere prioriteit dan de andere 5 stations. Het station dat als basis dient voor de validatie is Roompot Buiten.

Op elk van de stations worden gegevens elke 10 seconden gemeten. Deze metingen worden gemiddeld over 10 minuten. Het midden van de 10 minuten is de tijd gekoppeld aan de periode. Gedurende het verwerkingsproces vinden een aantal controles plaats. De controles worden uitgevoerd door operationeel beheer.

1. Op deze 10 minuut waarde vind een eerste controle plaats op het station zelf. Deze controle bestaat uit een sigma, delta, min, max en missende waarde controle. Een sigma controle bestaat uit het afwijzen van een meting indien deze buiten een aantal standaarddeviaties van het gemiddelde ligt. De delta methode bestaat uit het afwijzen van een meting zodra het verschil met een vorige meting boven een drempel uitkomt. De min en max validaties keuren een meting af zodra deze onder of boven een gedefinieerde waarde komen. De missende waarde controle bestaat uit dat er in een tijdsspanne van 10 minuten een minimaal aantal waarden beschikbaar moeten zijn (bij ten minste 54 van de 60 metingen binnen 10 minuten is een meting valide ). De controles zijn geïmplementeerd in de signaalverwerkingssoftware en geconfigureerd per station. Zodra de 10 minuten waarde berekend is en de kwaliteitscode bekend dan stuurt het station zijn gegevens naar de Landelijk Meetnet Water (LMW) Database
2. Zodra de gegevens binnenkomen in de LMW database wordt de momentane validatie uitgevoerd. Missende gegevens worden vervangen door waarde van de backupsensor. Indien geen backupsensor beschikbaar is worden de gegevens opgevuld met behulp van een Multiple Lineaire Regressie (MLR).
3. 3x per uur vindt de tijdsvenster validatie plaats. Het resultaat van de tijdsvenster validatie is dat er codes aan de gegevens worden toegevoegd. Deze codes hebben de vorm van een integere waarde met een bijbehorende betekenis. De validatie codes kunnen gebruikt worden om gegevens te duiden, zijn ze gemeten, met welk instrument, of zijn ze geschat.

- De tijdsvenster validatie volgt dezelfde procedure als de momentane validatie. Deze kan tot andere resultaten leiden als er inmiddels meer metingen zijn binnengekomen.
4. 2x per dag wordt een visuele validatie van de vaste meetnetten uitgevoerd. De inspecteur kan waarden aanpassen of afkeuren. Na de aanpassing, goed of afkeuring wordt een nieuwe code toegekend. De database van het Hydro Meteo Centrum (HMC) (genoemd naar Waterloopkunde Zierikzee (WTZ)) is de basis voor visuele validatie. Roompot Buiten met zijn 4 sensoren is de referentie als deze consistent zijn. Met in achtname van fase en amplitude worden controles uitgevoerd. M2 methode is basis voor afwijkende sensoren. De M2 methode detecteert afwijkingen in de fase en amplitude van belangrijkste getijcomponent. Komt het hoogwater steeds een beetje vroeger of later, of daalt het hoogwater langzaam, dan is er misschien iets niet goed met het instrument.
  5. Maandvalidatie & jaarvalidatie. Voor 5 kustlocaties wordt een maandelijkse validatie uitgevoerd. Voor de andere locaties wordt een jaarlijkse validatie gedaan. Na de maandvalidatie wordt aan Data Opslag Natte Rijkswaterstaat (DONAR) geleverd. De gegevens van de stations langs de kust worden berekend ten opzichte van het Normaal Amsterdams Peil (NAP). De offshore stations meten ten opzichte van gemiddeld zeeniveau.
  6. 1x/7jaar wordt de bout-NAP ingemeten, door waterpassing. Voor stations die in het water staan is dat al een lange tijd niet gedaan.

Het LMW heeft een lopende historie van 30 dagen. Na afloop van 30 dagen worden de gegevens uit het LMW verwijderd. De gegevens uit waterbase/DONAR vormen de basis voor de berekening van de jaar en maand gemiddelden.

De gegevens worden gemiddeld door een gemiddelde toe te passen op de reeks van getallen. De methode hiervoor staat in Dillingh (2013) beschreven. De bron van de middeling is het DONAR systeem. De jaargemiddelde waterstanden staan niet op de door Rijkswaterstaat bijgehouden lijst met op te leveren informatie producten. Ze zijn de afgelopen jaren geleverd aan de PSMSL maar dit is nog geen officiële procedure.

## **Beschreven**

De precieze details van de methoden staan beperkt beschreven. De informatie hoe gemeten wordt, met welke instrumenten, welke correcties handmatig worden toegepast, de details van de methoden en de configuratie zijn niet openbaar beschikbaar. Van een deel hiervan (welke instrumenten gebruikt worden) worden actuele gegevens bijgehouden in de Centrale Meetinstrumenten Database (CMDDB) en in het Centrale Instrumenten Bestand (CIB). Kwaliteitscodes zijn niet beschikbaar via de plekken waar de gegevens ontsloten worden (bijv. waterbase, actuele waterdata). De details van de meetmethode kwaliteit en metadata zijn relevant bij het interpreteren van de metingen.

## **Traceerbaar**

De gegevens worden in de meest ruwe vorm (de 10 seconde data) niet bewaard. De diverse validatiestappen worden door validatiecodes bijgehouden. Hierdoor is een belangrijk onderdeel van de traceerbaarheid vastgelegd (zijn de gegevens gemeten, met welk instrument, of zijn ze geschat). De afgeleide gegevens in de vorm van 1/10min waarden worden opgeslagen. Hierin zitten al enkele toegepaste correcties (opgevuld, metingen vervangen, aanpassingen naar aanleiding van visuele inspectie). Nadat de gegevens in DONAR zijn overgezet worden de gegevens verwijderd uit het LMW. De kwaliteitscodes zijn hierna niet meer beschikbaar.

## **Overdraagbaar**

Een aantal van de onderdelen van de procedure (configureren van de validaties, opwerken van de gegevens tot jaar en maandgemiddelden) wordt door 1 persoon uitgevoerd en werd in de interviews als niet overdraagbaar gekenmerkt.

## **Herhaalbaar**

De metingen worden continu dubbel uitgevoerd. Soms met dezelfde soms met verschillende instrumenten. Ook de eerste stappen van het validatie proces worden door verschillende organisatie onderdelen (LMW, HMC) dubbel uitgevoerd. Ook de stap om de jaargemiddelden uit de 10 minuten waarden af te leiden is wel eens succesvol herhaald. De ijking en jaarlijkse validatie zijn niet op herhaalbaarheid getoetst.

## **Herleidbaar (software en data)**

De software waarmee de gegevens worden ingewonnen is specifiek voor het LMW. Delen van de software worden niet meer onderhouden. De software is niet open source. Voor de opwerking van de gegevens van 10 minuten waarde is aparte software, maar de laatste keer is deze opwerking met excel uitgevoerd. Er wordt geen versiebeheer toegepast op de gegevens en configuratie.

## **Conclusies en aanbeveling**

Op onderdelen is de reproduceerbaarheid goed te noemen (dubbel uitgevoerd, dubbel gevalideerd, en herhaalbaarheid getoetst). Dit is ook wat we mogen verwachten van gegevens die voor verschillende toepassingen essentieel (scheepvaart, kustveiligheid, waarschuwingen) en voor een aantal andere toepassingen belangrijk zijn (zoals voor kustbeheer en klimaatberekeningen).

Op sommige onderdelen, met name in de beschrijving, de overdraagbaarheid en herleidbaarheid liggen mogelijkheden en uitdagingen. De relevante informatie is niet publiek beschikbaar en ook intern niet altijd goed beschreven. De informatie hoe gegevens zijn gemeten, gecorrigeerd en of ingevuld geven de noodzakelijke context bij de duiding van gegevens. De overdraagbaarheid is beperkt doordat er onderdelen in het proces zitten die rusten op een enkel persoon. De herleidbaarheid van de software en data is beperkt omdat de ruwe data niet worden bewaard en de versies van software en configuraties niet worden bijgehouden.

We bevelen daarom het volgende aan:

- Handhaaf de dubbele uitvoering van de processen (meting, validatie).
- De afgeleide producten gaan uit van een volledige reeks. In de praktijk ontstaan soms gaten door het uitvallen van instrumenten. Blijf gebruik maken van een opvulmethode.
- Controleer de herhaalbaarheid van de opwerking van gegevens periodiek (1x 6 jaar) als vast onderdeel van het proces
- Beschrijf de procedure van (op volgorde) correcties, validatie, opwerking, meting, meetinstrumenten, inrichting stations en maak deze informatie publiek beschikbaar
- Maak de software die gebruikt wordt voor de validatie en invulling open source of gebruik open source software
- Sla de ruwe gegevens (hoogfrequent, ongeaggregeerd, ongevalideerd), zodat correcties en invullingen eenduidig te herleiden zijn en verbeterde methodes retrospectief toegepast kunnen worden
- Gebruik versiebeheer en houdt versies bij van gebruikte software en configuratie.

- Betrek Deltares bij aanpassingen in de hoogte systemen.
- Overweeg het verhogen van de prioriteit van het station in IJmuiden in lijn met de definitie van het concept van “hoofdstations”.
- Zorg dat ten minste twee personen elk onderdeel van het proces beheersen (overdraagbaarheid).
- Rapporteer de gegevens ook ten opzichte van de peilbouten (zonder correcties). Hierdoor kunnen bij nieuwe schattingen van bodemdalingen retrospectief betere schattingen worden gemaakt (herhaling van advies van Dillingh 2010) .
- De validatiecodes zijn nu alleen beschikbaar in het LMW. Maak de validatiecodes ook beschikbaar in DONAR en ook publiek beschikbaar via de diverse services.
- Neem de overdracht van gegevens naar PSMSL op in de procedure
- Draag actuele gegevens over aan de wereldwijde dataset bij University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC)

## 5 Acroniemen en namen

DONAR	Data Opslag Natte Rijkswaterstaat: opslag systeem voor gegevens bij Rijkswaterstaat
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level
LMW	Landelijk Meetnet Water: verricht verschillende soorten metingen in Nederland en op de Noordzee: waterstand, afvoer en stroming, golven, watertemperatuur en diverse meteorologische gegeven
HMC	Hydro Meteo Centra: verantwoordelijk voor verwachtingen van waterstanden, golven en stroming in de Nederlandse kustwateren
CMDB	Centrale meetinstrumenten database? Dataset van instrumenten beschikbaar binnen Rijkswaterstaat
CIB	Centrale instrumenten bestand? Dataset van instrumenten beschikbaar binnen Rijkswaterstaat
WTZ	Waterloopkunde Zierikzee: Database met waterstandsgegevens
RWS	Rijkswaterstaat
RWsOS	Voorspellingssysteem voor waterstanden en golven.
Matroos	Multifunctional Access Tool foR Operational Oceandata Services. Ontsluiting van historische en actuele waterstandsmetingen en voorspellingen.
MLR	Multipiele/meervoudige lineaire regressie, een statistische methode, onder andere te gebruiken om missende waarden terug te schatten.
Waterbase	Database voor basisgegevens van de historie van de waterkwantiteit
MWTL	Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands
UHSLC	University of Hawaii Sea Level Center: internationale dataset van actuele waterstandsgegevens
M2 methode	Detectie van verschuivingen in de fases van de “principal lunar semi-diurnal” (M2) component
NAP	Normaal Amsterdams Peil: Verticaal hoogtesysteem in gebruik in Nederland

## 6 Literatuur

[Baart and Kooi, 2016] Baart, F. and Kooi, H. (2016). Zeespiegel onderzoeksagenda. Technical Report 1230046-000, Deltares.

[Baart et al., 2015] Baart, F., Leander, R., de Ronde, J., de Vries, H., Vuik, V., and Nicolai, R. (2015). Zeespiegelmonitor 2014. Technical Report 1209426.202, Deltares, HKV en KNMI.

[Baker, 2016] Baker, M. (2016). 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. *Nature*, 533(7604):452–454.

[de Bruijne and voor Geodesie, 2005] de Bruijne, A. and voor Geodesie, N. C. (2005). De geodetische refer- entiestelsels van Nederland: definitie en vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties. NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie.

[de Ronde, 1984] de Ronde, J. (1984). Grenspeilen 1981.0: Bepaling van nieuwe grenspeilen voor de kust- stations. Technical report, Rijkswaterstaat, RIKZ.

[Dillingh, 2013] Dillingh, D. (2013). Kenmerkende waarden kustwateren en grote rivieren. Technical Report 1207509-000, Deltares.

[Dillingh et al., 2010] Dillingh, D., Fedor, B., and de Ronde, J. (2010). Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Technical Report 1201993–002, Deltares.

[Schooler, 2014] Schooler, J. W. (2014). Metascience could rescue thereplication crisis'. *Nature*, 515:9.

[van Veen, 1945] van Veen, J. (1945). Bestaat er een geologische bodemdaling te Amsterdam sedert 1700. *Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap*, 2(62):2–36. In Dutch.

### Kopie aan

Robin Nicolai, HKV, Evelien van Eijsbergen, RWS, Claire van Oeveren, Deltares,  
Peter Heinen, RWS, Hans van Zeijl, RWS

#### **10.4 Advies gebruik methode Frederikse in de zeespiegelmonitor**

# memorandum

**PR2695.40**

Project : Zeespiegelmonitor: regionale verschillen in zeespiegelstijging  
Datum : september 2017  
Onderwerp : Advies gebruik methode 'Frederikse' in de zeespiegelmonitor  
Van : Robin Nicolai m.m.v. Guus Rongen en met review door Vincent Vuik  
Aan : Fedor Baart (Deltares)

---

## **Aanleiding**

De actuele snelheid waarmee de zeespiegel stijgt is voor diverse overheidsvraagstukken een belangrijke indicator. Denk hierbij aan het beheer en onderhoud van de kust c.q. het suppletiebeleid, de wettelijke beoordeling van primaire waterkeringen en de aardgaswinning in de Waddenzee.

De vraag is of er naast de methode die nu is opgesteld voor de bepaling van de actuele snelheid van de zeespiegelstijging (Baart et al., 2015) nog andere methoden zijn, die de huidige methode nu of in de toekomst kunnen vervangen. Deze notitie gaat in op de bruikbaarheid van (onderdelen van) één bepaalde methode.

## **Huidige methode actuele zeespiegelstijging**

In de zeespiegelmonitor wordt de actuele snelheid waarmee de zeespiegel stijgt (relatieve zeespiegelstijging t.o.v. de bodem<sup>1</sup>) bepaald door middel van regressieanalyse op jaargemiddelde zeewaterstanden. Het statistische regressiemodel bevat een constante term, een lineaire trendparameter, het 18,6-jarige nodale getij en de wind. Het model wordt toegepast op het algehele gemiddelde van de jaargemiddelde zeewaterstanden op de 6 hoofdstations langs de Nederlandse kust: Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Harlingen, West-Terschelling en Delfzijl.

De software-implementatie van het model in Python voert volautomatisch een reeks diagnostische toetsen uit (significantie van het model, significantie van de parameters, toets op normaliteit van de residuen). Bovendien toetst de software ook op de aanwezigheid van een trendbreuk (gebroken lineair model) en een versnelling in de zeespiegelstijging (kwadratisch model). De prestaties van deze modellen worden vergeleken met het standaard lineaire regressiemodel via het Akaike Information Criterion (AIC) en het Schwarz Information Criterion (SIC). Op dit moment presteert het lineaire regressiemodel het beste, maar is de fit van het gebroken model (trendbreuk in het jaar 1993<sup>2</sup>) niet slechter.

De huidige methode kent zijn basis in de wetenschappelijke literatuur, maar hierin zijn ook wel andere, meer fysische, modellen voor het beschrijven en voorspellen van de zeespiegel voorgesteld. De methode in de zeespiegelmonitor is vooral een statistische. Fysische verschijnselen anders dan de 18,6-jarige nodale cyclus en variaties in de jaargemiddelde windsnelheid zijn geen onderdeel van de methode. In deze notitie staat een advies over de bruikbaarheid van een methode die statistische en fysische modellen combineert, met een inschatting van de

---

<sup>1</sup> Relatieve zeespiegelstijging is de stijging van de zeespiegel ten opzichte van de bodem. Dit is de som van de absolute zeespiegelstijgingen van de absolute bodemdaling.

<sup>2</sup> In CLO (2016) wordt wetenschappelijke literatuur aangehaald waarin een trendbreuk in de wereldwijde zeespiegelstijging in het jaar 1993 is gevonden (zie <http://www.clo.nl/indicatoren/nl0229-zeespiegelstand-nederland-en-mondiaal>, zie ook Dieng et al., 2017). Deze trendbreuk kan deels worden toegeschreven aan de introductie van het gebruik van nauwkeurige satellietgegevens van de zeespiegel in 1992.

toepasbaarheid in de zeespiegelmonitor. We duiden deze methode aan als de methode 'Frederikse', naar de eerste auteur van de referentie Frederikse et al. (2016).

### **Beschrijving Methode Frederikse**

In Frederikse et al. (2016) is een zogeheten state-space model<sup>3</sup> geformuleerd om de variatie in zeewaterstanden over de tijd te beschrijven. Het basismodel bevat een in de tijd variërende trend en een residu, dat is opgesplitst in een autoregressief en een irregulier deel. Een variant van het model heeft als verklarende variabelen de wind, de luchtdruk, de nodale cyclus en enkele oscillatiefactoren gerelateerd aan geofysische processen op de oceanen (indicatoren voor de veranderingen hierin)<sup>4</sup>.

In een andere variant is ook de invloed van de windopzet op de zeewaterstand via het Dutch Continental Shelf Model (DCSM) als verklarende variabele toegevoegd<sup>5</sup>. Het blijkt dat de uitkomsten van DCSM een groot deel van de variatie in de zeespiegel verklaren. De auteurs laten hiermee zien dat het nuttig is om een fysisch, hydrodynamische model zoals DCSM als verklarende variabele toe te voegen.

Uit de methode volgt ook een over de tijd gemiddelde trend. Deze is bepaald door de integraal van de trendwaarden over de gehele meetreeks (1980-2013) te bepalen. In het artikel is de gemiddelde trend vergeleken met de 'vaste' trend uit een lineair regressiemodel. Dit is gedaan voor het basismodel en de twee varianten. Telkens is de trend met het regressiemodel met dezelfde additionele componenten vergeleken. Uit de vergelijking volgt dat de trendschattingen uit de modellen duidelijk kunnen verschillen. Bovendien is de onzekerheid rondom de gemiddelde trend telkens hoger dan de onzekerheid rondom de lineaire trend.

### **Afweging**

De methode Frederikse verschilt op vier punten van de huidige methode:

1. in de tijd variërende trend in plaats van een lineaire trend;
2. autocorrelatie in de residuen;
3. de software-implementatie is nog niet open source en nog niet gedocumenteerd;
4. toevoeging van hydrodynamisch model voor de stormopzet als verklarende variabele.

De reden dat Frederikse een state-space model met een in de tijd variërende trend definieert is dat veel geofysische processen geen lineaire trend kennen. De focus van het artikel is op variatie in de zeespiegel op middellange termijn ('variability on decadal scale and longer'), veroorzaakt door veranderingen in stormopzet. Deze variatie beïnvloedt namelijk de schatting van een lineaire trend uit een beperkte reeks zeewaterstanden sterk. In het artikel wordt gesteld dat een tijdreeks van minimaal 60 jaar nodig is om een trend van 2 mm ofwel 20 cm per jaar te kunnen detecteren.

Op zichzelf zijn bovenstaande redenen valide argumenten om een flexibeler model te formuleren. Daar staat echter tegenover dat de huidige methode gebruik maakt van reeksen vanaf het jaar 1890. De lengte van de reeks jaargemiddelde zeewaterstanden is dus 127 jaar. Dit is voldoende om een lineaire trend in de zeespiegelstijging te detecteren. Ten tweede is in de zeespiegelmonitor

---

<sup>3</sup> Een state space model is een econometrisch model dat de toestand van een fenomeen over de tijd beschrijft. De modelcomponenten kunnen op ieder tijdstip een andere waarde (niveau, toestand) aannemen. De parameters van het model zijn de mate van autoregressie en de variantie van de residuen.

<sup>4</sup> Pacific Decadal Oscillation (PDO): anomalies of ocean water temperatures in the Pacific Ocean. Multivariate El Niño-Southern Oscillation Index (MEI): variability cause by El Niño events. North Atlantic Oscillation (NAO): measures the differences in the anomalies of the sea level pressure between subtropical and Arctic regions in the Atlantic Ocean. Bij de ontwikkeling van de zeespiegelmonitor zijn luchtdruk en NAO ook als regressors aan het model toegevoegd, maar deze variabelen verklaren slechts een zeer klein deel van de variatie in de zeespiegel.

<sup>5</sup> Deze variant van het model bevat niet de wind zelf als onafhankelijke verklarende variabele.



behoefte aan een robuuste schatting van de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. De schatting moet niet heel erg gevoelig zijn voor de variatie in de zeespiegel op een tijdschaal van zo'n 5 tot 10 jaar. Uit persoonlijke communicatie met Thomas Frederikse en Riccardo Riva volgt dat de tijdsafhankelijke trend sterk verschilt over de jaren. Een lopend gemiddelde van de tijdsafhankelijke trend over 20 jaar loopt van 1 mm/jaar rond 1970 tot boven 3 mm/jaar in de jaren '90 en tot onder 1 mm/jaar na het jaar 2000.

De introductie van het state-space model compliceert de statistische schatting van de parameters wel enigszins. Om de in tijd variërende trend en de autoregressie in de residuen te schatten wordt een Kalman filter toegepast. Dit is een in de literatuur bekende schattingsmethode die rekenintensiever is dan de kleinste kwadratenmethode waarmee het lineaire regressiemodel wordt geschat. De aanwezigheid van autocorrelatie in de residuen is overigens met de Durbin-Watson of Breusch-Godfrey toets aan te tonen. Indien sprake is van autocorrelatie dan kunnen de standaardfouten onderschat worden. In de econometrische literatuur zijn methoden opgesteld om robuuste standaardfouten te schatten, die minder gevoelig zijn voor autocorrelatie in de residuen.

Als derde vermelden we dat de software-implementatie in MATLAB eigendom is van de TU Delft. De code is op dit moment nog niet open source, maar de TU Delft<sup>6</sup> overweegt de software wel open source aan te bieden onder bijvoorbeeld een GNU-licentie. De software is momenteel nog niet erg gebruikersvriendelijk en de code is nog niet erg toegankelijk<sup>7</sup>.

De tussentijdse conclusie van de bovenstaande afweging van de voor- en nadelen van de state-space formulering is dat deze statistische methode *voor het doel van de zeespiegelmonitor* geen toegevoegde waarde oplevert ten opzichte van het lineaire regressiemodel.

Het vierde en wellicht belangrijkste verschil met de huidige methode is de toevoeging van het hydrodynamische model aan het statistische model als verklarende variabele. Dit heeft drie voordelen ten opzichte van het model met verklarende variabelen wind en luchtdruk. Ten eerste brengt het hydrodynamische model niet-lineaire effecten in rekening. Ten tweede lost dit model de interactie tussen het getij en de stormopzet expliciet op. Ten derde verklaart de toegevoegde term een groot deel van de variatie in de zeespiegel. Het lijkt voordelig om het lineaire regressiemodel uit te breiden met de resultaten van een hydrodynamisch model. We gaan daarom nu iets dieper in op de mogelijkheden en beperkingen van het gebruik van hydrodynamische modellen in de zeespiegelmonitor.

Het statistische model in Frederikse et al. (2016) is dus uitgebreid met de stormopzet uit het Dutch Continental Shelf Model (DCSM). Dit model schat het effect van de wind op de Noordzee nauwkeurig, rekening houdend met de regionale bathymetrie. Het model heeft een hoge resolutie, is speciaal voor de Noordzee ontwikkeld en er is al veel ervaring mee opgebouwd. Zo zijn met het model ook al ERA-interim windvelden (1979-heden) doorgerekend. De rekentijd van een berekening van een jaar is orde grootte 2 dagen.<sup>8</sup>

Een globaal model, zoals het Global Tidal Shelf Model (GTSM), biedt de mogelijkheid om ook rekening te houden met de cumulatieve respons van de oceaan op van de evenaar afkomstige samengestelde windvelden. De resolutie van dit model is minder hoog dan die van DCSM. Verder is er nog weinig ervaring opgebouwd met het rekenen met langjarige reeksen windvelden in GTSM.

<sup>6</sup> Persoonlijke communicatie met Riccardo Riva (TU Delft, Faculteit CITG, [R.E.M.Riva@tudelft.nl](mailto:R.E.M.Riva@tudelft.nl)).

<sup>7</sup> Persoonlijke communicatie met Thomas Frederikse (TU Delft, Faculteit CITG, [t.frederikse@tudelft.nl](mailto:t.frederikse@tudelft.nl)).

<sup>8</sup> Deze inschatting volgt na persoonlijke communicatie met prof. Martin Verlaan ([martin.verlaan@deltares.nl](mailto:martin.verlaan@deltares.nl), TU Delft en Deltares), co-auteur van het artikel Frederikse et al. (2016), en expert op het gebied van hydrodynamische modellen.

Binnenkort volgt uit de langjarige runs van het GTSM met ERA-interim windvelden een goede inschatting van de rekentijd.

De keuze voor een windveld is erg belangrijk. Voor de zeespiegelmonitor is een zo lang mogelijke homogene reeks gewenst. Momenteel wordt de maandelijkse wind op 10 m hoogte gebaseerd op de 'NCEP reanalysis of the NCAR' van NOAA gebruikt. Deze gaan tot 1948 terug.<sup>9</sup> Het kost enige inspanning om de hydrodynamische modellen te voeden met andere windvelden. Vooral het uitvoeren van testen en controles kost doorlooptijd. De inspanning in mensdagen is minder groot. Bovendien kan in de toekomst gebruik worden gemaakt van het GTSM model met ERA-interim windvelden(1979-nu), dat binnenkort wordt doorgerekend.

De resultaten van een hydrodynamisch model zijn als verklarende variabele in het regressiemodel van toegevoegde waarde voor de zeespiegelmonitor. Het is op dit moment nog niet nodig om een keuze te maken voor GTSM of DCSM. Beide hebben hun specifieke eigenschappen en bijkomende voor- en nadelen. Met DCSM is vooralsnog meer ervaring opgebouwd.

### **Advies**

De huidige methode voor het bepalen van de actuele trend in de zeespiegelstijging is gebaseerd op een regressiemodel met een lineaire trend. In Frederikse et al. (2016) wordt daarentegen gewerkt met een in de tijd variërende trend, via een zogenaamd state-space model. Alle voor- en nadelen afwegend is ons advies om dit model *niet* over te nemen in de zeespiegelmonitor. De in de tijd variërende trend is namelijk omgeven door veel onzekerheid en dit nadeel weegt niet op tegen de voordelen. De state-space formulering heeft daarom geen toegevoegde waarde voor de schatting van de trend in de zeespiegelstijging.

In de huidige methode in de zeespiegelmonitor is een statistische toets op autocorrelatie opgenomen. Er is weinig reden om aan te nemen dat autocorrelatie een grote rol speelt in de jaargemiddelde waterstanden. Wel kan de toets in de zeespiegelmonitor explicieter worden uitgevoerd. Het verdient bovendien aanbeveling om de standaardfouten op een meer robuuste wijze te schatten, zeker in het geval dat autocorrelatie een rol speelt.

De toevoeging van de resultaten van een hydrodynamisch model (storm surge model) als verklarende variabele is een goede aanvulling op de huidige methode in de zeespiegelmonitor. Het Global Tidal Shelf Model (GTSM) en het Dutch Continental Shelf model (DCSM) hebben ieder hun eigen voordelen. Binnenkort zullen zulke berekeningen voor het eerst met GTSM worden uitgevoerd. Een no-regret actie is het doorgeven van de lijst met kuststations aan Martin Verlaan. Hij zal deze dan toevoegen aan de set uitvoerlocaties van de GTSM-berekeningen. Hieruit volgt meteen een idee van de doorlooptijd van zulke berekeningen, en inzicht in de bruikbaarheid en kwaliteit van de uitvoer.

We adviseren Rijkswaterstaat om de huidige methode uit te breiden met de resultaten van een hydrodynamisch model en in de komende twee jaar de prestaties van dit uitgebreide model te vergelijken met het huidige model. Na twee jaar beslist Rijkswaterstaat welk model de basis gaat worden voor het bepalen van de actuele trend in de zeespiegelstijging. Een afweging van de inzet van GTSM of DCSM is onderdeel van de werkzaamheden die tot de uitbreiding leiden.

Voor de softwarewijzigingen en het opdoen van ervaring met het nieuwe model is een inspanning van 30-40 dagen nodig.

---

<sup>9</sup> In het verleden zijn ook experimenten uitgevoerd met windgegevens uit de 20th century reanalysis van NOAA.

## Referenties en bronnen

Baart et al. (2015).

Zeespiegelmonitor 2014. Fedor Baart, Robert Leander, John de Ronde (Deltares), Hylke de Vries (KNMI), Vincent Vuik en Robin Nicolai (HKV). Deltares rapport 1209426-000-VEB-0008.

Dieng et al., 2017. Geophysical Research Letters 44: 3744 - 3751 Dieng, Habib-Boubacar & Cazenave, Aanny & Meyssignac, Benoit & Michaël, Ablain. (2017). New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach: Sea level budget. Geophysical Research Letters. 10.1002/2017GL073308.

CLO (2016)

Stand zeespiegel langs de Nederlandse kust en mondiaal, 1890-2014 (indicator 0229, versie 09, 17 maart 2016). Compendium voor de Leefomgeving (CLO), CBS, Den Haag; Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Den Haag/Bilthoven en Wageningen UR, Wageningen. [www.compendiumvoordeleefomgeving.nl](http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl)

Frederikse et al. (2016)

Estimating decadal variability in sea level from tide gauge records: An application to the North Sea, Frederikse, T., R. Riva, C. Slobbe, T. Broerse, and M. Verlaan (2016), J. Geophys. Res. Oceans, 121(3), March 2016, pp. 1529–1545. doi:10.1002/2015JC011174.

### *Hydrodynamische modellen*

DCSM: Dutch Continental Shelf Model

Presentatie:

<https://www.deltares.nl/en/webinars/hydrodynamic-modeling-on-the-northwest-european-shelf-and-north-sea-new-opportunities-with-delft3d-flexible-mesh/>

Factsheet:

[https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/37345/factsheet-dcsm\\_zuno-generatie\\_5-v2016\\_1.pdf](https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/37345/factsheet-dcsm_zuno-generatie_5-v2016_1.pdf)

GTSM: Global Tidal Shelf Model

Presentatie:

[https://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/99058008/JONSMOD2014\\_Presentation\\_4-5\\_Verlaan.pdf?version=1&modificationDate=1401272961000](https://publicwiki.deltares.nl/download/attachments/99058008/JONSMOD2014_Presentation_4-5_Verlaan.pdf?version=1&modificationDate=1401272961000)

Referentie:

Kernkamp, H. W. J., Van Dam, A., Stelling, G. S. & de Goede, E. D. Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf. Ocean Dyn. 61, 1175–1188 (2011).

### *Windvelden*

ERA-Interim reanalysis windvelden (ECWMF)

Referentie global atmospheric reanalysis from 1979, continuously updated in real time: Dee, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. R. Meteorol. Soc. 137, 553–597 (2011).

NOAA-windvelden

Website "NCEP reanalysis of the NCAR" from 1948

<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

Websites 20<sup>th</sup> century reanalysis (data).

[https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC\\_Rean/](https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean/)

[https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC\\_ReanV2c.html](https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2c.html)

<https://rda.ucar.edu/datasets/ds131.2/>

## **10.5 Zeespiegelmonitor: Eenduidige zeespiegelindicatoren**

Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat**

# **Zeespiegelmonitor**

Eenduidige zeespiegelindicatoren





Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat**

# **Zeespiegelmonitor**

Eenduidige zeespiegelindicatoren



**Auteurs:**

Robin Nicolai (HKV)  
Guus Rongen (HKV)  
Fedor Baart (Deltares)





# Inhoud

<b>Lijst van tabellen .....</b>	<b>i</b>
<b>Lijst van figuren .....</b>	<b>iii</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>5</b>
1.1 Aanleiding .....	5
1.2 Zeespiegelstijging: absoluut versus relatief .....	6
1.3 Indicatoren: scope en kenmerken .....	8
1.4 Groslijst indicatoren .....	9
<b>2 Uitwerking indicatoren .....</b>	<b>11</b>
2.1 Beheer en onderhoud .....	11
2.1.1 Trend in de actuele zeespiegelstijging .....	11
2.1.2 Vergunningsverlening delfstoffenwinning .....	13
2.1.3 Samenvatting en discussie .....	14
2.2 Toetsing .....	15
2.2.1 Getijhoogwaterstijging .....	15
2.2.2 Samenvatting en discussie .....	16
2.3 Ontwerp .....	17
2.3.1 Absolute zeespiegelstijging .....	21
2.3.2 Lange termijn waterhuishouding .....	24
2.3.3 Samenvatting en discussie .....	25
2.4 Planvorming .....	27
2.4.1 Indicator "percentage onder zeeniveau" .....	27
2.4.2 Vrije ruimte .....	28
2.4.3 Ruimtelijke ontwikkeling .....	28
2.4.4 Samenvatting en discussie .....	29
<b>3 Synthese en aanbevelingen .....</b>	<b>31</b>
3.1 Samenvatting .....	31
3.2 Aanbevelingen .....	33
<b>4 Referenties .....</b>	<b>37</b>
<b>Bijlage A: Verslag expertsessie .....</b>	<b>41</b>



## Lijst van tabellen

Tabel 1-1:	Definities zeespiegel(stijging) en bodemdaling .....	7
Tabel 2-1:	Absolute zeespiegelstijging in de KNMI'06 scenario's. ....	19
Tabel 2-2:	Absolute zeespiegelstijging in de Veerman-scenario's. ....	20
Tabel 2-3:	Absolute zeespiegelstijging in de KNMI'14 scenario's. ....	21
Tabel 2-4:	Zeespiegelgetallen voor het ontwerp van zachte keringen. Bron: Leidraad Zandige Kust (2002).....	23
Tabel 2-5:	Scenario's 3 <sup>e</sup> Kustnota. Bron: RWS (2000). ....	23
Tabel 3-1:	Zeespiegelindicatoren in waterveiligheidsbeleid.....	32



## Lijst van figuren

Figuur 1-1:	Absolute versus relatieve zeespiegelstijging en bodemdaling. Bron: Figuur 2.1 Baart et al. (2015).	6
Figuur 1-2:	Gereviseerd lokaal hoogteniveau zoals in gebruik voor het station IJmuiden (bron: PSMSL). Het niveau TGBM (tide gauge benchmark) slaat op het referentiepunt ten opzichte waarvan het getij wordt gemeten. Het niveau RLR (2007) is ongeveer 7000 mm onder het gemiddeld zeeniveau, een arbitrair gekozen referentieniveau waarbij jaar- en maandgemiddelden positief zijn. MSL (2007) is het gemiddeld zeeniveau voor 2007. Het NAP is het nationale hoogtesysteem. De aanpassing van het NAP (0,021 m omhoog in 2005) is verwerkt door de PSMSL via de methode beschreven door Dillingh et al. (2010). Bron: Figuur 2.2 Baart et al. (2015).	7
Figuur 2-1:	KNMI'06-scenario's. De aangegeven banden geven het bereik tussen het 10 <sup>de</sup> en 90 <sup>ste</sup> percentiel aan.	19
Figuur 2-2:	Veerman-scenario's.	20
Figuur 2-3:	Zeespiegelstijging binnen de Deltascenario's.	20
Figuur 2-4:	Totstandkoming van de 48 cm klimaattoeslag zoals dit gebruikt wordt bij het ontwerp van harde keringen.	22
Figuur 2-5:	Zeespiegelstijging volgens de Veerman-scenario's met daarin de voor de zeesluizen van IJmuiden gebruikte stijging.	24
Figuur 2-6:	Variabelen voor het aangeven van zeespiegelstijging. ZJ = zichtjaar.	26
Figuur 2-7:	Profiel van de vrije ruimte. Bron. <a href="http://www.stowa.nl">www.stowa.nl</a> .	28
Figuur 3-1:	Zichtjaren toepassingsgebieden zeespiegelstijging.	32
Figuur 3-2:	Verschillende partijen (leiblaauw: overheid, aquamarijn: kennisinstituut, pruim: bedrijven) zijn betrokken bij zeespiegelonderzoek. De overlap met kolommen geeft de hoofdtak aan van de organisatie. Bijvoorbeeld Rijkswaterstaat houdt zich vooral bezig met onderhoud en toetsing. PBL houdt zich vooral bezig met planvorming. De organisaties boven de rij met onderhoud, toetsing, ontwerp en planvorming houden zich vooral bezig met beleidsvorming. De organisaties onder de rij houden zich vooral bezig met onderzoek en advisering.	35



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

De stand van de zeespiegel ten opzichte van de bodem, nu en in de toekomst, is een belangrijke indicator voor de Nederlandse waterveiligheid. Bij veel beleidsvraagstukken op het gebied van onderhoud, toetsing, ontwerp en planvorming speelt de zeespiegel een rol. Afhankelijk van de toepassing wordt meestal een andere indicator voor de zeespiegelstijging gebruikt. Het is hierbij niet altijd voor iedereen duidelijk hoe de gekozen indicator precies is gedefinieerd, laat staan hoe deze is gekwantificeerd. De zeespiegelindicatoren zijn onderling niet consistent. De cijfers zijn gebaseerd op verschillende aannames, methoden, data, perioden en gebruikte correcties.

### **Zeespiegelmonitor – Zeespiegel onderzoeksagenda 2016-2018**

Het periodiek rapporteren over de huidige staat van de zeespiegel langs de Nederlandse kust wordt de "Zeespiegelmonitor" genoemd. Deze monitor bestaat uit periodieke rapportages (Dillingh et al., 2010, de Ronde et al., 2014, Baart et al., 2015) en de beschikbaarheid van de methode in de vorm van software (webapplicatie). In de Zeespiegelmonitor worden de ruwe zeespiegelmetingen omgezet in meerdere zeespiegelindicatoren. Een voorbeeld van een indicator is "de huidige zeespiegelstijging".

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 (Baart et al., 2016), waarin de aandacht ligt op de onderstaande hoofdonderwerpen:

- **Begrip**  
Kunnen we de variaties in de zeespiegel goed verklaren? Weten we welke oorzaken verschillen tussen metingen veroorzaken en hebben we deze kennis goed geformaliseerd in onze methoden?
- **Integratie**  
Sluiten de verschillende toepassingen van de zeespiegel op elkaar aan en worden alle toepassingen afgedekt?
- **Vertrouwen**  
Kloppen de metingen en de voorspellingen, zijn ze valide en reproduceerbaar?

De resultaten van de deelonderzoeken worden gecombineerd in een update van de zeespiegelmonitor, die toegankelijk, begrijpelijk en traceerbaar is.

Op dit moment hebben slechts enkele experts het overzicht over welke zeespiegelindicator voor welke toepassing wordt gebruikt en waarom. Het doel is om deze kennis breed toegankelijk te maken. In dit rapport zijn daarom de verschillende indicatoren die in het Nederlands beleid worden toegepast op overzichtelijke wijze en in detail uitgewerkt op basis van vragen als:

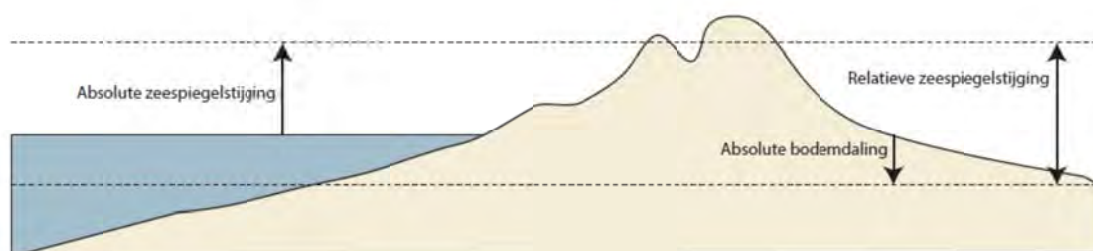
- Welke definities worden gehanteerd?
- Welke factoren worden meegenomen?
- Hoe verhouden getalswaarden zich tot elkaar?
- Wat is het toepassingsgebied van de indicator? Welk beleidsterrein betreft deze toepassing?
- Door wie wordt de indicator bepaald en toegepast?

- Sluiten de verschillende toepassingen op elkaar aan?
- Worden alle toepassingen wel voldoende afgedekt?

## 1.2 Zeespiegelstijging: absoluut versus relatief<sup>1</sup>

Het begrip zeespiegelstijging behoeft enige toelichting. We maken onderscheid tussen absolute en relatieve zeespiegelstijging. Relatief ten opzichte van wat? Wat is de referentie? Met relatieve zeespiegelstijging wordt bedoeld hoeveel de zeespiegel stijgt ten opzichte van de bodem. Het is de som van hoeveel de zeespiegel stijgt ten opzichte van 'zichzelf' en hoeveel de bodem daalt ten opzichte van 'zichzelf' (zie Figuur 1-1).

De zeespiegel wordt niet ten opzichte van zichzelf gemeten maar ten opzichte van een referentievlak. Rijkswaterstaat meet de zeespiegel langs de Nederlandse kust ten opzichte van het NAP. Op zee, waar het NAP niet meer geldig is, wordt gemeten ten opzichte van European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89). Het NAP kan langs de kust worden beschouwd als een referentie voor de diepere ondergrond, zoals gekoppeld aan de ondergrondse merken. Een aantal processen (bijvoorbeeld klink en erosie) zorgt voor absolute bodemdaling ten opzichte van NAP. Een aantal andere processen zorgen voor een verandering van het NAP, bijvoorbeeld glaciële uplift en zwaartekrachtveranderingen door smelting. De term relatieve zeespiegel wordt vaak gebruikt om te verwijzen naar zeespiegel zoals gemeten met een getijstation. Met absolute zeespiegel wordt vaak verwezen naar metingen gedaan met satellieten<sup>2</sup>.



Figuur 1-1: Absolute versus relatieve zeespiegelstijging en bodemdaling. Bron: Figuur 2.1 Baart et al. (2015).

De bodemdaling wordt ten opzichte van hetzelfde referentieniveau bekeken. Omdat relatieve bodemdaling en relatieve zeespiegelstijging hetzelfde zijn, wordt bij het onderscheid tussen of iets als bodemdaling of zeespiegelstijging wordt bestempeld naar het onderliggende proces gekeken. Erosie, klink, verzakkingen door grondwater of gasonttrekkingen zijn processen die onder de noemer bodemdaling passen. Langs de kust worden deze processen gemeten door de topografie en bathymetrie te meten. Bij de bepaling van de sterkte van de kust worden de zeespiegelstand en de kusthoogte weer gecombineerd, zodat de veiligheid gebaseerd is op de volledige relatieve zeespiegelstijging.

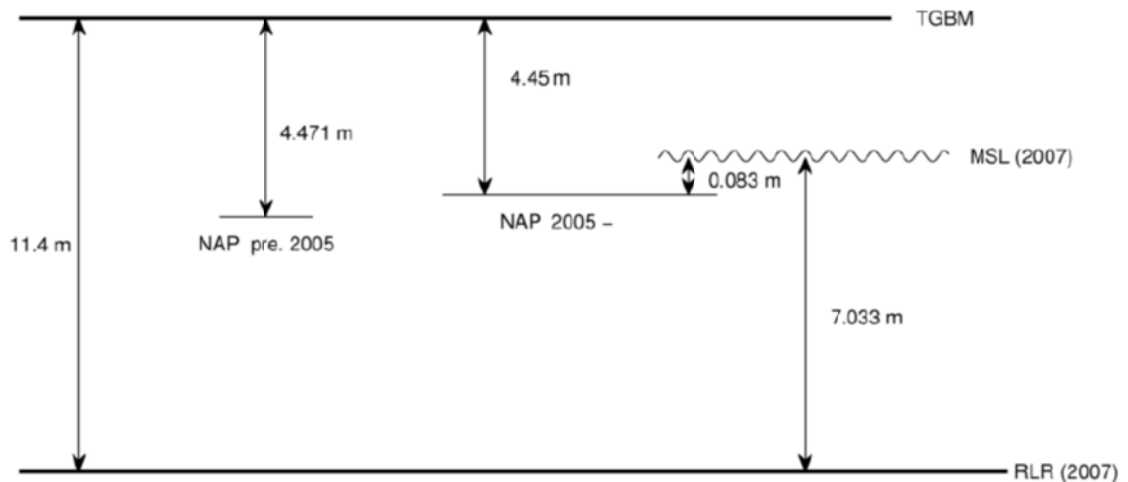
Voor het rekenen met zeespiegelstanden wordt gebruik gemaakt van een zogenaamd lokaal gerevisieerd hoogteniveau, in Nederland gebaseerd op het NAP. De details hiervan staan beschreven in Dillingh et al. (2010). De lokaal gerevisieerde hoogtegegevens worden opgeslagen en verspreid via de internationale dataset van getijmetingen (Permanent Service for Mean

<sup>1</sup> Deze paragraaf is in aangepaste vorm overgenomen uit Baart et al. (2015).

<sup>2</sup> Absolute zeespiegel wordt uitgedrukt ten opzichte van een referentie-ellipsoïde. ETRS89 is net als bijvoorbeeld WGS84 een referentie-ellipsoïde.



Sea Level (PSMSL), zie bijvoorbeeld Figuur 1-2. Over het algemeen wordt momenteel de waterstand ten opzichte van het post-2005 NAP gebruikt. Dit niveau ligt 2.1 cm hoger dan het pre-2005 NAP.



*Figuur 1-2: Gereviseerd lokaal hoogteniveau zoals in gebruik voor het station IJmuiden (bron: PSMSL). Het niveau TGBM (tide gauge benchmark) slaat op het referentiepunt ten opzichte waarvan het getij wordt gemeten. Het niveau RLR (2007) is ongeveer 7000 mm onder het gemiddeld zeeniveau, een arbitrair gekozen referentieniveau waarbij jaar- en maandgemiddelden positief zijn. MSL (2007) is het gemiddeld zeeniveau voor 2007. Het NAP is het nationale hoogtesysteem. De aanpassing van het NAP (0,021 m omhoog in 2005) is verwerkt door de PSMSL via de methode beschreven door Dillingh et al. (2010).  
Bron: Figuur 2.2 Baart et al. (2015).*

De relatieve zeespiegelstijging bevat zowel een bodemdalingscomponent als een absolute zeespiegelstijgingscomponent. Meestal worden deze twee processen door aparte vakgebieden bestudeerd. Kenmerkend voor bodemdaling is dat het lastiger is om de verschillende componenten te onderscheiden. Het is lastiger om onder de grond te meten dan onder water. Verder is de kennis over hoe de bodemdaling nu precies in de relatieve zeespiegelstijging doorwerkt niet breed verspreid. Welke bodemdaling wordt er nu wel meegenomen en welke niet? Deze vragen vallen buiten de scope van dit rapport en worden elders behandeld<sup>3</sup>. Dit rapport richt zich op eenduidige zeespiegelindicatoren.

Onderstaande tabel vat de definities van de drie begrippen relatieve zeespiegel, relatieve zeespiegelstijging en relatieve bodemdaling nog eens samen.

Begrip	Definitie
Relatieve zeespiegel	Stand van de zeespiegel ten opzichte van de bodem (in m+NAP)
Relatieve zeespiegelstijging	Stijging van de zeespiegel ten opzichte van de bodem. Dit is de som van de (absolute) zeespiegelstijging t.o.v. zichzelf en van de (absolute) bodemdaling t.o.v. zichzelf.
Relatieve bodemdaling	Relatieve zeespiegelstijging

*Tabel 1-1: Definities zeespiegel(stijging) en bodemdaling.*

<sup>3</sup> In paragraaf 3.1 van Baart et al. (2016) zijn acties geformuleerd om tot een betere integratie van bodem- en zeespiegelveranderingen te komen. Deze acties worden in 2016/2017 uitgevoerd in het kennisprogramma Kustgenese 2.0. Het beoogde resultaat van de acties is een beter begrip van verschillende componenten van bodemdaling en de verwerking van de bodem in zeespiegelindicatoren.

## 1.3 Indicatoren: scope en kenmerken

Bij de uitwerking van indicatoren voor de zeespiegel zijn alleen indicatoren beschouwd die aan de volgende voorwaarden voldoen:

1. De indicator heeft een duidelijke directe relatie met de Nederlandse zeespiegel (dus bijvoorbeeld niet het volume smeltend landijs);
2. De indicator leidt tot een actie;
3. De indicator komt terug in Nederlands beleid.

Met de laatste twee voorwaarden is enigszins soepel omgegaan. Niet alle indicatoren leiden immers direct tot een actie of komen terug in het (huidige) beleid, maar worden wel in onderliggende analyses gebruikt.

Een onderzoeksvraag is of de genoemde koppelingen van indicatoren aan toepassingen genoeg aansluiten. Ook is de vraag hoe de genoemde koppelingen precies tot uiting komen in het beleid. We onderscheiden vier toepassingen: beheer en onderhoud, toetsing op veiligheid, ontwerp en (ruimtelijke) planvorming:

- Beheer en onderhoud: jaarlijks worden zandsuppleties uitgevoerd langs de Nederlandse kust. De suppletiebehoefte is gebaseerd op de huidige trend<sup>4</sup> in de relatieve zeespiegelstijging;
- Toetsing: de huidige stand van de relatieve zeespiegel wordt gebruikt om het huidige niveau van waterveiligheid te bepalen;
- Ontwerp: de toekomstige stand van de relatieve zeespiegel is van belang bij het ontwerpen van waterkeringen of waterkerende constructies met een levensduur van enkele tientallen jaren;
- Planvorming, in de zin van ruimtelijke ordening / ontwikkelingen: de zeespiegel voor de volgende generaties is van belang voor het vestigingsklimaat. De zeespiegelstijging heeft een directe invloed op het overstromingsrisico en bepaalt dus (indirect) waar 'we' wel of beter niet kunnen gaan wonen. Diverse organisaties (ministeries, provincies, CPB, PBL, Deltacommissaris) gebruiken zeespiegelscenario's in analyses van toekomstplannen.

In een expertsessie (zie kader en Bijlage A) zijn de bovengenoemde indicatoren voor de 4 toepassingen besproken. Uit de discussies met en tussen de experts onderling blijkt dat deze indicatoren inderdaad terugkomen in het beleid. De experts hebben ook gediscussieerd over de verschillen tussen de indicatoren, trends in het beleid en andere indicatoren. De discussies hebben geleid tot een aanscherping en uitbreiding van de in het beleid gehanteerde indicatoren.

### Expertsessie zeespiegelindicatoren

In een workshop op 10 november 2016 is een eerste versie van de uitwerking van de 4 indicatoren besproken met experts van RWS op het gebied van de kust en de zeespiegel. De aanwezigen vertegenwoordigden de 4 toepassingen. Doel van de workshop: feedback halen op de eerste uitwerking en het benoemen van ontbrekende zeespiegelindicatoren. De feedback en de ontbrekende indicatoren zijn verwerkt in deze rapportage. Een verslag van de expertsessie staat in Bijlage A van dit rapport.

De toepassing van een indicator is slechts één kenmerk. Andere relevante kenmerken zijn:

- definitie: de wijze waarop het is opgeschreven en de interpretatie;

<sup>4</sup> Met trend in de (relatieve) zeespiegelstijging bedoelen we in het vervolg de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt (in cm/eeuw bijvoorbeeld).

- type: hoogwater, laagwater, gemiddelde waterstand;
- toepassing: (beleids)terrein waar het op van toepassing is;
- oorsprong: waar het voor het eerst voorkomt in beleidsstukken, uitgangsdokument en kaders;
- context: uitgebreide(re) beschrijving van toepassingsgebied;
- instituut: organisatie die het zeespiegelcijfer bepaalt of laat bepalen;
- programma: naam van het programma waarin het cijfer uiteindelijk wordt gebruikt;
- status: de status van het cijfer, in gebruik, ter discussie of nog niet vastgesteld;
- gebruiker: organisatie die het beleid uitvoert waarop het getal is gebaseerd;
- verantwoording getalswaarde: hoe het getal tot stand is gekomen, referentie naar het document waarin dit is beschreven.

In het vervolg van dit document zijn de indicatoren uitgewerkt aan de hand van deze kenmerken.

## 1.4 Groslijst indicatoren

Er zijn ook andere indicatoren dan de hierboven bij de verschillende toepassingsgebieden genoemde. Hieronder volgt een groslijst van indicatoren zonder dat daarbij is gecontroleerd of deze wel aan de drie in paragraaf 1.3 genoemde voorwaarden voldoen:

- Huidige stand relatieve zeespiegel: ruimtelijk gemiddelde zeewaterstand (in m+NAP);
- Huidige stand absolute zeespiegel: ruimtelijk gemiddelde zeewaterstand (in m+NAP);
- Huidige relatieve hoogwaterstand (in m+NAP);
- Huidige trend in de relatieve zeespiegelstijging (snelheid in m/jaar);
- Toekomstige relatieve zeespiegel (in m+NAP);
- Stijging van de relatieve zeespiegel tussen jaar x en jaar y (in m);
- Toekomstige trend in de relatieve zeespiegelstijging: trend in stijging van de gemiddelde waterstand, laagwaterstand of hoogwaterstand (snelheid in m/jaar);
- Huidige stand van de absolute zeespiegel (in m+NAP);
- Stijging van de absolute zeespiegel tussen jaar x en jaar y (in m);
- Relatieve / absolute zeespiegelstijging waarin rekening wordt gehouden met een versnelling;
- Huidig / toekomstig niveau van de bodem (in m+NAP);
- Huidige / toekomstige trend in de bodemdaling (snelheid in m/jaar);
- Percentage oppervlakte Nederland onder zeeniveau, waarbij behoefte is aan een definitie van zeeniveau;
- Percentage oppervlakte Nederland dat overstroomt zonder dijken.

Enkele van deze indicatoren komen terug in de 4 genoemde toepassingen, die in hoofdstuk 2.1 t/m 2.4 zijn uitgewerkt. Ook binnen de beleidsterreinen delfstoffenwinning en de lange termijn waterhuishouding bestaan toepassingen van zeespiegelindicatoren. Deze worden respectievelijk behandeld bij de toepassingen B&O kust en ontwerp.



## 2 Uitwerking indicatoren

### 2.1 Beheer en onderhoud

#### 2.1.1 Trend in de actuele zeespiegelstijging

De overheid heeft zich als taak gesteld om de kustlijn en het kustfundament dynamisch te handhaven. Dit handhaven gebeurt in de vorm van zandsuppleties. Het beleidsuitgangspunt is dat geen structurele erosie van de kustlijn plaatsvindt en dat het kustfundament meegroeit met de zeespiegel. Beide doelen zijn sinds de 3<sup>e</sup> Kustnota (RWS, 2000) herhaald in diverse stukken (Nota Ruimte, 2004; Integraal Beheerplan Noordzee, 2007; Nationaal Waterplan 2009-2015 en 2016-2021; Nationaal Kader Kust, 2011; Nationale Visie Kust, 2013; Beslissing Zand, 2014; Suppletieprogramma Kustlijnzorg; 2015). Het benodigde zandvolume om mee te groeien wordt voor een belangrijk deel bepaald als het product van 'het oppervlak van het kustfundament' en 'de actuele zeespiegelstijging'. De trend in de actuele zeespiegelstijging is dus de indicator die voor het beheer en onderhoud van de kust wordt gebruikt.

Sinds 2001 wordt jaarlijks gemiddeld 12 miljoen m<sup>3</sup> zand gesuppleerd langs de Nederlandse kust. Dit is de richtwaarde uit de 3<sup>e</sup> Kustnota die in de uitvoering van het beleid in het programma Kustlijnzorg is overgenomen. DG Water en Ruimte neemt op basis van de inzichten uit het programma Kustgenese 2.0 in 2020 een beslissing over het benodigde suppletievolume voor de jaren daarna.

Kustfundament, zeespiegelstijging en suppletievolume zijn direct gekoppeld aan elkaar. De basis voor het huidige suppletievolume is een rapport uit het jaar 2000. In Mulder (2000) wordt gesteld dat de totale suppletiebehoefte bij gelijkblijvende trend in de zeespiegelstijging van 20 cm/eeuw wordt geschat op gemiddeld 12 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (met een maximum van 16 miljoen m<sup>3</sup> per jaar). In het geschatte volume is niet alleen rekening gehouden met zandverlies van het kustfundament, maar ook dat van de Waddenzee en de Westerschelde. Basisuitgangspunt bij de bepaling van het suppletievolume is de aanname dat de sedimentvraag van de kust op lange termijn bepaald wordt door het oppervlak van het zanddelende kuststelsel (zie kader).

<b>Basiskustlijn</b>	Met het handhaven van de basiskustlijn (BKL) wordt de structurele achteruitgang van de Nederlandse kust tegengegaan en blijven de functies in het zandige kuststelsel behouden. In 1990 is in de eerste Kustnota gekozen voor het dynamisch handhaven en is de BKL voor het eerst vastgelegd. In 2012 is deze voor het laatst herzien. De BKL is een benadering van de laagwaterlijn en is gebaseerd op een rekenschijf (zie Basiskustlijn 2012).
<b>Kustfundament</b>	Het kustfundament omvat het gehele gebied, nat én droog, dat als geheel van belang is als drager van functies in het kustgebied (Nota Ruimte, 2004). Het kustfundament wordt als volgt begrensd: <ul style="list-style-type: none"> <li>- de zeezijde grens bestaat uit de doorgaande NAP-20 m lijn;</li> <li>- aan de landzijde omvat het kustfundament alle duingebieden én alle daarop gelegen harde zeeeringen.</li> </ul> De Waddenzee en de Westerschelde maken geen onderdeel uit van het kustfundament. Deze groeien zelfstandig mee, maar het zand wordt wel onttrokken aan het kustfundament.
<b>Kuststelsel</b>	De combinatie van het kustfundament, de Waddenzee en de Westerschelde wordt het zanddelende kuststelsel genoemd (Nederbragt, 2005).

De 20 cm/eeuw, het “minimale scenario” in de 3<sup>e</sup> Kustnota, is een afgeronde versie van wat toen de huidige trend in de relatieve zeespiegel was (de Ruig, 1995). De huidige zeespiegel werd tot en met 1990 bepaald in de vorm van slotgemiddelden (zie bijv. Kroos, 1982). De gehanteerde methode sluit aan bij de huidige methode van bepaling van de actuele trend in de relatieve zeespiegelstijging, in de zin dat rekening wordt gehouden met nodaal getij (Baart et al., 2015). De bepaling van slotgemiddelden heeft tussen 1990 en 2013 niet plaatsgevonden. De achterstand is ingehaald (Dillingh, 2013), maar de methode is nog niet gelijkgesteld met de methode van bepaling van de huidige zeespiegel voor de suppletiebehoefte.

We merken nog op dat Nederbragt (2005) – een actualisatie van Mulder (2000) – een conceptueel model presenteert dat de suppletiebehoefte eenduidig als functie van de zeespiegelstijging definieert. Hij beschouwt diverse zeespiegelstijgingsscenario's om zandverliezen in te schatten (20, 60 en 85 cm/eeuw). Voor het inschatten van het zandverlies door zeespiegelstijging is uitgegaan van de daadwerkelijk opgetreden zeespiegelstijging tussen 1973 en 1997 (onder verwijzing naar Dillingh, 2002). Enerzijds wordt dus met een scenario-analyse gewerkt, anderzijds met een schatting van de zeespiegelstijging. De analyse van Nederbragt (2005) heeft niet tot een aanpassing van het beleid geleid.

Enerzijds is de trend in de actuele zeespiegelstijging de indicator die wordt gebruikt voor de bepaling van het suppletievolume. Anderzijds is ook met (toekomst)scenario's gerekend. Op toekomstscenario's komen we bij andere toepassingen nog terug. Wat betreft de trend in de actuele zeespiegelstijging merken we nogmaals op dat in de afgelopen jaren een (eenduidige) standaard rekenmethode is ontwikkeld om deze te schatten (zie Dillingh et al., 2010; De Ronde et al., 2013 en Baart et al., 2015). Deze methode gebruikt als gegevens de (jaargemiddelde) relatieve zeespiegelstanden teruggerekend naar NAP post 2005, gemiddeld over de 6 hoofdstations langs de kust. Op deze gegevens wordt een lineair regressiemodel toegepast met enkele verklarende variabelen (zie paragraaf 4.8 van Baart et al., 2015).

<b>Kenmerken zeespiegelindicator voor Beheer en Onderhoud kust</b>	
Naam	Trend in de actuele zeespiegelstijging in cm per eeuw
Definitie	De trend in de ruimtelijk gemiddelde relatieve zeespiegelstijging in cm / eeuw
Type	Gemiddelde waterstand (ruimtelijk gemiddeld over kuststations)
Toepassing	Beheer en onderhoud Kust
Oorsprong	3 <sup>e</sup> Kustnota (2000)
Context	Het beleid ten aanzien van de waterveiligheid van de kust (3 <sup>e</sup> Kustnota, 2000; Nota Ruimte, 2004; Integraal Beheerplan Noordzee, 2007; Nationaal Waterplan, 2008; Nationaal Kader Kust, 2011; Nationale Visie Kust, 2013; Beslissing Zand DP2015, 2014; Suppletieprogramma Kustlijnzorg; 2015)
Instituut	Ministerie van Infrastructuur en Milieu
Programma	Kustgenese 2.0.
Status	In gebruik: in 2021 opnieuw vaststelling suppletievolume
Wie gebruikt het?	Rijkswaterstaat (beheer en onderhoud, programma Kustlijnzorg)
Verantwoordingsgetalswaarde	Mulder (2000)

In het kennisprogramma Kustgenese 2.0 wordt de integratie van bodemdaling en zeespiegelstijging verder onderzocht. Voor de bepaling van de suppletiebehoefte is inzicht nodig in de accommodatieruimte die wordt gecreëerd door relatieve zeespiegelstijging (absolute zeespiegelstijging incl. bodemdaling). Ook zullen hierin de aannames en uitgangspunten van

eerder uitgevoerde studies opnieuw tegen het licht worden gehouden, wat mogelijk zal leiden tot een nieuwe onderbouwing van het suppletievolume.

### 2.1.2 Vergunningsverlening delfstoffenwinning

Het Ministerie van Economische Zaken (EZ) heeft in 2015 TNO verzocht advies uit te brengen over het voor de delfstoffenwinning onder de Waddenzee met ingang van 2016 te hanteren beleidsscenario voor de zeespiegelstijging. Het gaat hier om gaswinningen die worden toegestaan voor een duur van enkele tientallen jaren, waarbij tussentijds ingrijpen mogelijk is, als dit nodig zou blijken te zijn. De ruimte voor winning wordt mede bepaald door de snelheid van de zeespiegelstijging. Het betreffende beleidsscenario wordt elke 5 jaar geactualiseerd op basis van recente inzichten. TNO (2016) adviseert om rekening te houden met zowel een trend als een versnelling in de relatieve zeespiegelstijging (zie onderstaande kader).

#### **Advies aangaande relatieve zeespiegelstijging (TNO, 2016)**

*Beleidsscenario, actualisering per 1.1.2016*

De snelheid van relatieve zeespiegelstijging (Z):

tot 2021:  $Z(J) = Z(2007) + (J - 2007) * A_1$

met  $Z(2007) = 2,181$  mm/jaar  
en  $A_1 = 0,0076$  mm/(jaar)<sup>2</sup>

m.i.v. 2021  $Z(J) = Z(2021) + (J - 2021) * A_2$

met  $A_2 = 0,058$  mm/(jaar)<sup>2</sup>

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

De coëfficiënten A<sub>1</sub> en A<sub>2</sub> representeren acceleratie in de zeespiegelstijging.

Het scenario-gedeelte 'm.i.v. 2021' worden tot 1.1.2021 beschouwd als een richtscenario. Per die datum zal op grond van de dan bestaande informatie en inzichten over het gedrag van de zeespiegel het scenario voor (tenminste) de dan komende 5 jaar worden vastgesteld, alsmede een nieuw richtscenario voor de periode daarna, etc.

Het TNO-advies is gebaseerd op het derde IPCC-rapport en daaropvolgende updates in 2011 en 2016. De resultaten uit de Zeespiegelmonitor 2014 (Baart et al., 2015) zijn ook meegenomen in de totstandkoming van het advies.

EZ hanteert bij haar besluitvorming een gebruiksruimte (meegroeivermogen minus het deel hiervan dat dient ter compensatie van de stijgende zeespiegel) van 5 mm per jaar. Het oorspronkelijk in het kader van de PKB (derde nota Waddenzee) geaccepteerde meegroeivermogen voor grote kombergingen zoals Vlie en Marsdiep bedroeg 3 mm/jaar. In onderstaand kader zijn de begrippen gebruiksruimte en meegroeivermogen nader toegelicht.

### **Meegroeivermogen en gebruiksruimte Waddenzee**

In de Waddenzee vindt van nature sedimentatie plaats. Dit betekent dat er zand en slib wordt afgezet op de zeebodem. Als gevolg hiervan kan een zekere mate van zeespiegelstijging door de Waddenzee bijgehouden worden. Dit wordt het meegroeivermogen (ook wel kritische zeespiegelstijging) van de Waddenzee genoemd. Het meegroeivermogen van de Waddenzee is gedefinieerd als:

“Het natuurlijke vermogen van een kombergingsgebied, uitgedrukt in mm/jaar over het hele gebied, om de relatieve zeespiegelstijging op lange termijn bij te houden, terwijl het geomorfologisch evenwicht en de sedimentbalans in stand blijven.”

De sedimentatie die in de Waddenzee plaatsvindt, kan ook de effecten van andere ontwikkelingen wegwerken, zoals de daling van de bodem door het winnen van delfstoffen. De Waddenzee heeft dus een zelfherstellend vermogen. Het zelfherstellend vermogen van de Waddenzee is afhankelijk van de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. Naarmate de zeespiegel sneller stijgt, is er voor de aanpassingen daaraan meer sediment nodig en resteert er steeds minder sediment om de effecten van andere ingrepen teniet te doen. De afhankelijkheid van het zelfherstellend vermogen van de Waddenzee van de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt, wordt uitgedrukt in de gebruiksruimte.

De gebruiksruimte van de Waddenzee is gedefinieerd als:

“Het verschil tussen het meegroeivermogen van een kombergingsgebied en de relatieve zeespiegelstijging. Dit verschil is de ruimte die te gebruiken is (na middeling over 6 jaar) voor menselijke activiteiten zoals bodemdaling door zoutwinning, die zandhonger genereren.”

Indien de bodemdaling binnen de gebruiksruimte blijft, dan kan de sedimentatie in de Waddenzee de bodemdaling bijhouden. In eerdere studies wordt er van uitgegaan dat de natuurlijke sedimenttransportprocessen in het Vlie een zeespiegelstijging van 3 tot 5 mm/jaar kunnen bijhouden en ca. 2 tot 3 mm/jaar voor het Marsdiep. Uit geologische studies blijkt dat in eerdere fasen van het Holoceen bij zeespiegelsnelheden van 3 tot 4 mm/jaar de achterliggende getijbekkens verdrinken. Een realistisch interval voor de kritische zeespiegelstijging is 3 tot 5 mm/jaar.

### **2.1.3 Samenvatting en discussie**

Het beleidsuitgangspunt is dat het kustfundament meegroeit met de zeespiegel. Hiertoe wordt jaarlijks zand gesuppleerd. De suppletiebehoefte is een functie van de (trend in de) actuele zeespiegelstijging. De benodigde hoeveelheid zand is bepaald op 12 miljoen m<sup>3</sup> per jaar bij een trend in de zeespiegelstijging van 20 cm / eeuw.

De berekening van de zeespiegelindicator ‘trend in de actuele zeespiegelstijging’ is in het verleden goed gedocumenteerd. Op deze indicator is het suppletiebeleid geënt. In de nabije toekomst (2020) zal een nieuwe beslissing worden genomen over het benodigde suppletievolume. Bij het bepalen van deze indicator is het van belang om een standaard rekenmethode vast te leggen (en ook periodiek toe te passen). De methode moet eenduidig zijn in de te gebruiken gegevens en statistische technieken waarmee de huidige trend in de ruimtelijk gemiddelde relatieve zeespiegelstijging wordt bepaald (zie paragraaf 4.8 in Baart et al., 2015). Het is hierbij nog wel de vraag of regionale trends in de relatieve zeespiegelstijging bruikbaar zijn. Deltares en HKV voeren in 2017 onderzoek uit naar regionale verschillen in de zeespiegel (zie Baart et al., 2016).



In de expertsessie is ook genoemd dat het goed zou zijn om inzicht te verkrijgen in de accommodatieruimte die wordt gecreëerd door absolute zeespiegelstijging en bodemdaling separaat in beeld worden gebracht. Dit is een activiteit die in Kustgenese 2.0 wordt opgepakt.

Voor de vergunningsverlening delfstoffenwinning is de actuele zeespiegelstijging ook als indicator in gebruik. TNO (2016) adviseert om rekening te houden met zowel een trend als een versnelling in de relatieve zeespiegelstijging.

## 2.2 Toetsing

### 2.2.1 Getijhoogwaterstijging

Vanaf 1 januari 2017 is de nieuwe normering van kracht op alle primaire waterkeringen in Nederland. De normering is gebaseerd op het overstromingsrisico en de norm van de waterkeringen is uitgedrukt als een overstromingskans. In het kader van het Wettelijke BeoordelingsInstrumentarium 2017 (WBI2017) is een nieuw instrumentarium ontwikkeld om de Hydraulische Randvoorwaarden, o.a. maatgevende hoogwaters, af te leiden. Het nieuwe instrumentarium stelt ook software beschikbaar om te beoordelen of de waterkeringen aan de nieuwe normen voldoen. Het nieuwe instrumentarium is de (beoogd) vervanger van het huidige Wettelijke ToetsInstrumentarium (WTI2006, inclusief de HR2006). Beide instrumentaria houden rekening met de zeespiegelstijging. Hieronder volgt een toelichting op de in HR2006 en WBI2017 gebruikte indicator voor de zeespiegelstijging. In het onderstaande kader staat een meer technische toelichting.

In de HR2006 is gekozen voor regionaal variërende hoogwaterstanden gebaseerd op de lineaire trend uit de hoogwaters over een bepaalde periode (1985-2011) en de stand van 1985. Hierbij is wel een beperkte periode vooruitgekeken. Gezien deze keuze is het mogelijk om de actuele (hoog)waterstand als indicator te beschouwen, maar deze is dus wel gebaseerd op een trend in de hoogwaters.

In het WBI2017 zijn de toeslagen voor getijhoogwaterstijging (in de referentie omschreven als "zeespiegelrijzing en lokale effecten") bepaald voor de periode 1985-2023 op basis van een statistische analyse van tijdreeksen van hoogwaterstanden tot en met 2012 voor 23 stations. Aanname hierbij is dat de gemiddelde trend (in de stijging) tussen 1985 en 2012 zich voortzet tot 2023. De gemiddelde toeslagen langs de Nederlandse kust, Westerschelde en Waddenzee zijn voor de periode 1985-2023 gelijk aan de toeslagen voor de periode 1985-2017 (met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid).

### Technische toelichting indicatoren Toetsing

De wettelijke instrumentaria maken gebruik van statistiek van hoogwaterstanden. Deze statistiek geldt voor een bepaald referentiejaar. De zeespiegelstijging tussen het referentiejaar en het einde van de toetsperiode is in de vorm van een toeslag op de hoogwaterstand meegenomen (dus niet op de gemiddelde waterstand!). In de HR2006, het vigerende randvoorwaardenboek (RWS, 2007), staat dat een toeslag is opgenomen voor de getijhoogwaterstijging van 0,6 tot 1,4 decimeter in 2011 ten opzichte van 1985. Dit behoeft wat verduidelijking.

- Getijhoogwaterstijging: het gaat om de stijging van de gemiddelde hoogwaterstand (inclusief NAP daling) op diverse locaties;
- Het jaartal 2011 is het eind van de toetsperiode (derde toetsronde);
- Het jaartal 1985 is het jaar waarvoor de zogeheten basispeilen zijn bepaald. Basispeilen zijn maatgevende hoogwaterstanden langs de kust met een overschrijdingsfrequentie van  $1/10.000^{\circ}$  per jaar. Deze basispeilen zijn in 1993 vastgesteld voor negen peilmeetstations (Dillingh, 1993). Zowel statistische als fysische analyses zijn uitgevoerd. De basispeilen en bijbehorende overschrijdingsfrequentielijnen zijn uiteindelijk ruimtelijk opgeschaald voor locaties langs de gehele Nederlandse kust;
- De toeslagen zijn bepaald "uit gemeten hoogwaterstanden".

In het WBI2017 is onderzocht of de basispeilen herzien moesten worden (zie Chbab, 2015). Na een analyse op verlengde reeksen van hoogwaterpieken van 5 hoofdstations zijn de vigerende basispeilen gehandhaafd. Toeslagen voor getijhoogwaterstijging (in de referentie omschreven als "zeespiegelrijzing en lokale effecten") zijn bepaald voor de periode 1985-2023 op basis van een statistische analyse van tijdreeksen van hoogwaterstanden tot en met 2012 voor 23 stations. Aanname is dat de gemiddelde trend (in de stijging) tussen 1985 en 2012 zich voortzet tot 2023. De gemiddelde toeslagen langs de Nederlandse kust, Westerschelde en Waddenzee zijn voor de periode 1985-2023 gelijk aan de toeslagen voor de periode 1985-2017 (met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid).

De basispeilen zijn weliswaar niet herzien, maar in de loop der tijd blijkt de statistiek (kansverdeling, overschrijdingsfrequentie) van hoogwaterstanden in het wettelijke instrumentarium toch te zijn geactualiseerd. In de programmatuur voor de bepaling van de HR is de getijhoogwaterstijging via de statistiek ingevoerd. Dat is, de hoogwaterstand is geactualiseerd tot de getijhoogwaterstand in het laatste jaar van de toetsperiode. Dit is voor de HR2006 op correcte wijze geïmplementeerd. Binnen WBI2017 is de geactualiseerde toeslag voor getijhoogwaterstijging als separate toeslag opgenomen in de programmatuur. Daarnaast is de statistiek uit de eerdere programmatuur overgenomen. Dit betekent dat de "zeespiegelrijzing" (tussen 1985 en 2011) dubbel wordt meegeteld: zowel via de toeslag t.b.v. WBI2017 (1985-2023) als via een update van de statistiek t.b.v. de HR2006 (1985-2011).

Deze onjuistheid is gecorrigeerd in de betreffende programmatuur. Het voorbeeld laat zien dat de interpretatie van zeespiegelindicatoren niet eenvoudig en/of eenduidig is. Zelfs als de verantwoording prima op orde is.

## 2.2.2 Samenvatting en discussie

Voor de wettelijke beoordeling van primaire waterkeringen wordt een regionaal variërende toeslag op de getijhoogwaterstand gebruikt. Deze is gebaseerd op de lineaire trend in de

hoogwaters over een bepaalde periode, geëxtrapoléerd naar het einde van de toetsperiode, en de hoogwaterstand in het referentiejaar (1985).

De bepaling van de toeslag is goed gedocumenteerd. De indicator is ook wel eenduidig, al is het logischer / begrijpelijker om de maatgevende hoogwaterstanden langs de kust ('basispeilen') en de hoogwaterstandstatistiek te actualiseren voor het huidige jaar en een toeslag voor getijhoogwaterstijging te bepalen voor het eind van de beoordelingsperiode. Dit vraagt vermoedelijk een zeer grote inspanning.

Belangrijker is dat het niet is aangetoond dat de lineaire trend in de hoogwaters een goede voorspeller is voor de huidige hoogwaterstijging. Dit leidt in Baart et al. (2015) tot de aanbeveling om te overwegen de huidige zeespiegel en de huidige getijconstituenten apart te beschouwen en het huidige hoogwater *niet* te baseren op recente trends in hoogwaters.

Een aandachtspunt is tot slot de aansluiting van de voor de toetsing gebruikte zeespiegelindicator op die voor het ontwerp. Uiteindelijk worden de primaire waterkeringen ontworpen en beoordeeld op veiligheid volgens dezelfde normering. Afgezien van het verschil in type waterstand (gemiddelde waterstand vs. hoogwaterstand), blijkt ook dat in het ontwerp met absolute zeespiegelstijging wordt gewerkt (zie paragraaf 2.3).

<b>Kenmerken zeespiegelindicator voor wettelijke toetsing / beoordeling veiligheid waterkeringen</b>	
Naam	Toeslag getijhoogwaterstijging
Definitie	Regionaal variërende toeslag getijhoogwaterstijging in 2011 ten opzichte van 1985 (in m) N.B. Dit betreft relatieve zeespiegelstijging (relatief t.o.v. de bodem)
Type	Hoogwaterstand
Toepassing	Wettelijke toetsing (beoordeling) veiligheid primaire waterkeringen
Oorsprong	Hydraulische Randvoorwaarden (HR2006)
Context	Voor de toetsing op / beoordeling van de veiligheid van primaire waterkeringen is een wettelijk instrumentarium opgesteld. Bij het bepalen van (HR), dat zijn maatgevende hoogwaterstanden en hydraulische belastingen op de waterkering, is rekening gehouden met zeespiegelstijging ten opzichte van een bepaald jaar waarvoor de (statistiek van de) hoogwaterstanden (basispeilen) is afgeleid.
Instituut	Ministerie van Infrastructuur en Milieu
Programma	WTI (HR2006) en WBI2017 (Hoogwaterbeschermingsprogramma)
Status	Gebruikt, herzien voor nieuwe beoordelingsinstrumentarium (WBI2017)
Wie gebruikt het?	Rijkswaterstaat, Waterschappen
Verantwoording getalswaarde	Derde toetsronde: achtergrondrapportages HR2006, documenten Douwe Dillingh (teruggaand tot vaststelling basispeilen in 1985) WBI2017: Chbab (2015)

## 2.3 Ontwerp

Binnen de Nederlandse waterbouw worden ontwerpen gemaakt met een geplande levensduur van 50 tot 100 jaar. Op deze termijn zal de zeespiegel naar verwachting significant stijgen en dus wordt hier bij het ontwerp rekening mee gehouden. Een zichtperiode van 50 jaar of nog langer is te lang om statistische modellen te gebruiken voor prognoses van de zeespiegelstand (denk aan extrapolatie van de huidige trend). Deze prognoses zijn over het algemeen gebaseerd op de uitkomsten van fysische modellen voor verschillende klimaatscenario's. De

invoer voor zulke klimaatscenario's is bijvoorbeeld de CO<sub>2</sub>-emissie, waaruit vervolgens de temperatuurstijging en de hoeveelheid smeltend landijs berekend worden. De absolute zeespiegelstijging is een uitvoerparameter.

Specifiek voor Nederland hebben verschillende partijen in de afgelopen decennia klimaatscenario's afgeleid. Onderstaand kader geeft uitleg over de voor zeespiegelstijging relevante klimaatscenario's.

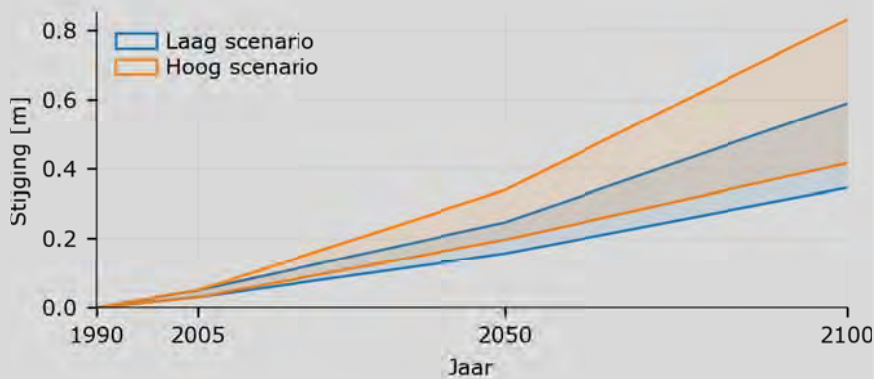
## Klimaatscenario's

Binnen de toepassingen ontwerp en ruimtelijke planvorming worden verschillende klimaatscenario's gebruikt. Hieronder volgt een samenvatting van de klimaatscenario's die voor deze studie van toepassing zijn.

### KNMI '06-scenario's

In 2006 heeft het KNMI een set klimaatscenario's gepresenteerd, die een update vormen van eerdere klimaatscenario's uit 2001. De reden voor de vernieuwing was een wens vanuit stakeholders en voortschrijdend wetenschappelijk inzicht op het gebied van klimaatveranderingen (KNMI, 2006).

Op het gebied van zeespiegelstijging wordt een voorspelling gedaan op basis van verschillende modellen, die fysische factoren meenemen die bijdragen aan de zeespiegelstijging (smeltend land- of zee-ijs, thermische expansie). Het resultaat is een bandbreedte van de absolute zeespiegelstijging voor 2050 en 2100, in een hoog en een laag scenario. Figuur 2-1 geeft de zeespiegelstijging volgens beide scenario's weer. De klimaatvoorspellingen zijn gedaan vanuit het jaar 2005, waarbij de gemeten zeespiegelstijging tussen 1990 en 2005 is opgeteld.



Figuur 2-1: KNMI '06-scenario's. De aangegeven banden geven het bereik tussen het 10<sup>de</sup> en 90<sup>ste</sup> percentiel aan.

De KNMI '06-scenario's worden ook wel vernoemd naar W, W+, G en G+, waarin de W staat voor warm, de G voor gematigd en de '+' voor verandering van de atmosferische circulatie. De in Figuur 2-1 weergegeven percentielen zijn uiteindelijk op 5 cm afgerond, wat de onderstaande zeespiegelstijgingen per zichtjaar geeft:

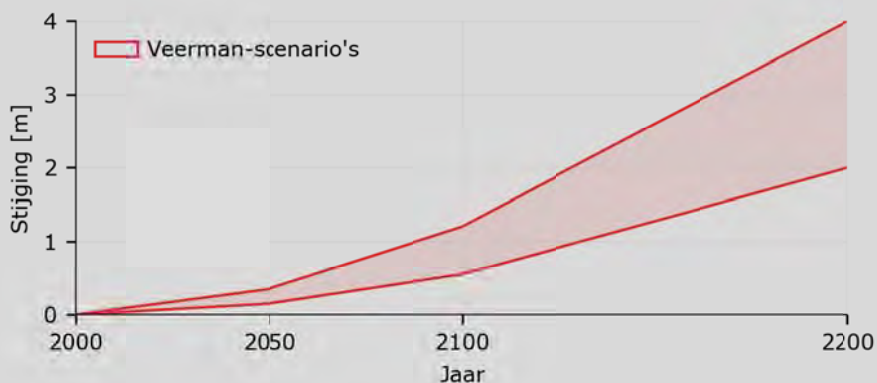
Scenario	2050 (t.o.v. 1990)	2100 (t.o.v. 1990)
G, G+	15 – 25 cm	35 – 60 cm
W, W+	20 – 35 cm	40 – 85 cm

Tabel 2-1: Absolute zeespiegelstijging in de KNMI '06 scenario's.

### Veerman-scenario's

In 2008 heeft de Deltacommissie een klimaatscenario gepresenteerd op basis van het meest conservatieve temperatuurscenario voor de komende eeuwen. De gedachte hierachter is dat een klimaatbestendige strategie voor waterveiligheid en waterbeheer gebaseerd moet zijn op de mogelijkheid dat stabilisatie van het klimaat bij hoge temperaturen niet optreedt. Dit scenario gebruikt dus de meest ongunstige voorspelling van het KNMI en IPCC, waarin fossiele brandstoffen de motor van de globale economie blijven. Figuur 2-2 geeft de absolute

zeespiegelstijging binnen de Veerman-scenario's weer. Opvallend is dat de voorspelling voor 2050 gelijk is aan die van het KNMI'06. Dit is te verklaren door het feit dat de ontwikkeling van de wereldeconomie tot 2050 een stuk voorspelbaarder is dan daarna. Tot 2050 zal het feit of men al dan niet overstapt op duurzame energiebronnen een stuk minder effect hebben dan voor de periode na 2050.



Figuur 2-2: Veerman-scenario's.

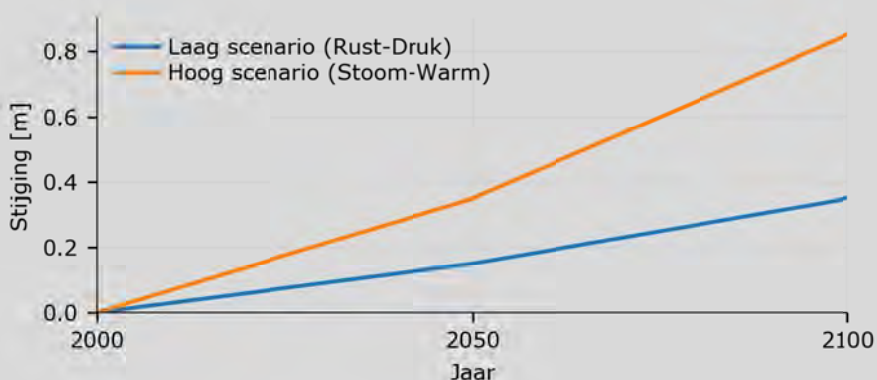
De waarden van de absolute zeespiegelstijging zijn weergegeven in onderstaande tabel:

Scenario	2050 (t.o.v. 2000)	2100 (t.o.v. 2000)	2200 (t.o.v. 2000)
Veerman	15 – 35 cm	55 – 120 cm	2 – 4 m

Tabel 2-2: Absolute zeespiegelstijging in de Veerman-scenario's.

### Deltascenario's

In kader van het Deltaprogramma zijn scenario's uitgewerkt voor de ontwikkeling van de maatschappij tot 2100. Deze zogenaamde Deltascenario's komen voort uit de KNMI'06 klimaatscenario's die in 2012 en 2013 nader zijn uitgewerkt (Deltaprogramma: Bruggeman et al., 2013). Er zijn 4 scenario's uitgewerkt, waarin onder andere de absolute stijging van de zeespiegel is bepaald. De 4 scenario's komen voort uit 2 bevolkingsgroeivoorspellingen en 2 temperatuurvoorspellingen. Voor de zeespiegel is alleen de tweede van belang, waardoor er twee scenario's van zeespiegelstijging overblijven met 'getallen' voor de jaren 2050 en 2100:



Figuur 2-3: Zeespiegelstijging binnen de Deltascenario's.

De Deltascenario's komen dus grofweg overeen met de ondergrens (2050: 15 cm, 2100: 35 cm) en bovengrens (2050: 35 cm, 2100: 85 cm) van de KNMI'06 scenario's. Het referentiejaar is echter wel veranderd van 1990 naar 2000, zonder dat de reeds opgetreden

zeespiegelstijging daarin verwerkt lijkt te zijn. Gezien de grofheid van de scenario's (afgerond op 5 cm) geeft dit geen grote fout.

De twee Deltascenario's worden ook wel aangegeven met W+ (het hoge scenario) en G (het lage scenario). Deze coderingen zijn afkomstig uit de KNMI'06 scenario's.

#### KNMI '14-scenario's

Het KNMI heeft in 2014 opnieuw klimaatscenario's bepaald voor zichtjaren 2050 en 2085. De klimaatscenario's zelf zijn afgeleid uit het IPCC rapport (2013), waarin de wetenschappelijke inzichten met betrekking tot klimaatonderzoek zijn samengevat. Het KNMI communiceert over de klimaatscenario's in termen van temperatuurscenario's. Het rekent net als het IPCC met CO<sub>2</sub>-emissiescenario's.

Uit het IPCC-rapport zijn door het KNMI 4 scenario's afgeleid: W<sub>L</sub>, W<sub>H</sub>, G<sub>L</sub> en G<sub>H</sub>. Hierin staat de eerste letter voor de temperatuur, warm of gematigd, en de tweede letter voor de luchtstroming, hoog en laag. Allen hebben een voorspelde temperatuurstijging waarbij een zeewaterstand is afgeleid. Het IPCC rekent met iets andere scenario's dan het KNMI waardoor er een vertaling is gemaakt van de IPCC naar de KNMI scenario's. De gematigde (G) scenario's komen voort uit de RCP 4.5 en RCP 6.0 scenario's van het IPCC, en de warme (W) scenario's zijn afgeleid van het RCP 8.5 scenario (RCP: Representative Concentration Pathways). Tabel 2-3 geeft de absolute zeespiegelstijging binnen de verschillende scenario's weer.

Scenario	2050 (t.o.v. klimaat 1981-2010)	2085 (t.o.v. klimaat 1981-2010)
G <sub>L</sub> , G <sub>H</sub>	15 – 30 cm	25 – 60 cm
W <sub>L</sub> , W <sub>H</sub>	20 – 40 cm	45 – 80 cm

Tabel 2-3: Absolute zeespiegelstijging in de KNMI'14 scenario's.

De auteurs zijn niet bekend met toepassingen van de KNMI'14-scenario's in ontwerp. Het KNMI doet wel suggesties voor het gebruik van deze scenario's in onderzoek naar adaptatie aan klimaatverandering (zie paragraaf 2.4).

### 2.3.1 Absolute zeespiegelstijging

#### Harde keringen - OI2014

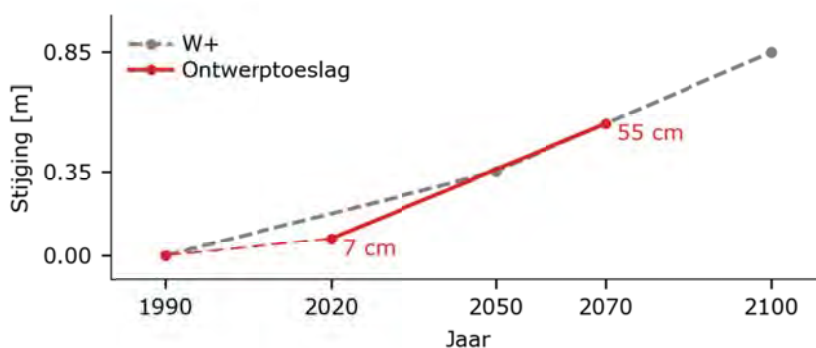
Binnen het ontwerp van harde waterkeringen wordt sinds enige tijd met een ontwerptoeslag van 48 cm gerekend om de zeespiegelstijging binnen de ontwerpduur (vaak 50 jaar) mee te nemen. Deze toeslag is afgeleid uit het OI2014 (Deltares, 2014) door lineair te interpoleren tussen de voorspelde waarden uit het W+ scenario van het KNMI (Deltascenario Stoom-Warm). De herkomst van deze maat voor de zeespiegelstijging is niet algemeen bekend, waardoor het niet bij alle ontwerpers dezelfde status heeft. Rijnen (2016) beschrijft in zijn afstudeerwerk de totstandkoming van de 48 cm, zonder hierbij het OI2014 te noemen. Vrij vertaald:

*“De momenteel gebruikte toeslag is gebaseerd op het 90<sup>ste</sup> percentiel van de SLR (Simple Linear Regression) van het W-scenario, zoals gepresenteerd door het KNMI. Dit scenario voorspelt een zeespiegelstijging van 35 cm in het jaar 2050 ten opzichte van de zeewaterstand in 1990. Echter, vanwege de wens om een levensduur van 50 jaar te bereiken, wordt de toeslag verhoogd met 1 cm per jaar voor de jaren na 2050. Rekening houden met de 7 cm stijging ten opzichte van 1990 resulteert dit in een toeslag van 48 cm voor een ontwerp met zichtjaar 2070.”*

Uit bovenstaande is een aantal zaken af te leiden:

- Er wordt gewerkt met het W-scenario van het KNMI (2006): 35 cm (absolute) zeespiegelstijging tot 2050. Dit wordt ook wel het W+ scenario genoemd. De keuze voor dit scenario komt voort uit het OI2014.
- Onzekerheid in de klimaattoeslag is niet expliciet meegenomen in het OI2014. Aan de scenario's is geen kans toegekend.
- Het gebruikte referentiejaar is 1990, consistent met de KNMI'06 scenario's.
- Er wordt met het W+ KNMI'06 scenario gerekend bij het ontwerp, nog niet met de KNMI'14-scenario's.
- De 48 cm is de toeslag die in 2020 gebruikt zal moeten worden bij een ontwerpduur van 50 jaar. In andere jaren zou de toeslag een andere waarde hebben, omdat de stijging tot 2050 langzamer gaat dan erna.

Figuur 2-4 laat de totstandkoming van de 48 cm tussen 2020 en 2070 zien.



Figuur 2-4: Totstandkoming van de 48 cm klimaattoeslag zoals dit gebruikt wordt bij het ontwerp van harde keringen.

De gebruikte indicator is in lijn met het OI2014 en de KNMI'06-scenario's. Een aantal punten is echter niet helemaal duidelijk:

- Het OI2014 verwijst voor de klimaatscenario's naar de Deltascenario's, die op hun beurt afgeleid zijn van de KNMI'06-scenario's. In de laatste wordt duidelijk 1990 als referentiejaar gebruikt, terwijl de Deltascenario's spreken over 2000. Dit geeft een dubbelzinnigheid in het referentiejaar, die nodig is om de reeds opgetreden zeespiegelstijging te compenseren.
- De 7 cm zeespiegelstijging tussen 1990 en 2020 komt grofweg overeen met de huidige trend. Het OI2014 volgend (lineaire interpolatie) zou men echter uitkomen op  $(35 \text{ cm} / 60 \text{ jaar}) \times 30 \text{ jaar} = 17.5 \text{ cm}$  stijging. De keuze om de opgetreden stijging te gebruiken is goed te onderbouwen, maar hierdoor ontstaat er wel een mix van metingen en scenario's die niet consistent zijn met elkaar.

In 2018 vindt een actualisatie van OI2014 plaats en zullen mogelijk KNMI'2014-scenario's worden gebruikt.

### Zachte keringen

Voor het toepassen van zeespiegelstijging bij het ontwerp van zachte zeeweringen kan gebruikt worden gemaakt van de gebruikte gegevens bij het project Zwakke Schakels Noord-Holland. Voor de kustversterkingen bij de Hondsbossche en Pettemer zeewering is gerekend met een zeespiegelstijging van 30 cm in de komende 50 jaar. Deze waarde is afkomstig uit de Leidraad Zandige Kust uit 2002 ofwel de 3<sup>e</sup> Kustnota. In Tabel 2-4 staan de zeespiegelgetallen voor verschillende scenario's en zichtjaren die deze leidraad aanbeveelt.



Jaar	2050	2100	2200
Minimumscenario	+ 0,10 cm	+ 0,20 cm	+ 0,40 cm
Middenscenario	+ 0,30 cm	+ 0,60 cm	+ 1,20 cm
Maximumscenario	+ 0,45 cm	+ 0,85 cm	+ 1,70 cm

Tabel 2-4: Zeespiegelgetallen voor het ontwerp van zachte keringen. Bron: Leidraad Zandige Kust (2002).

Het referentiejaar van deze klimaatscenario's lijkt gezien de lineaire trend 2000 te zijn (zie TAW, 2002ab). De getallen komen in dat geval precies overeen met de drie scenario's in de 3<sup>e</sup> Kustnota (RWS, 2000). Deze scenario's en hun beoogde toepassingen zijn in Tabel 2-5 samengevat.

Minimale scenario: 20 cm/eeuw	Toepassen bij beslissingen met korte ontwerpduur (orde 5 jaar), geringe investering of hoge mate van flexibiliteit (zandsuppleties, zie paragraaf 2.1.1).
Midden scenario: 60 cm/eeuw	Toepassen bij beslissingen met langere ontwerpduur (orde 50-100 jaar), grote investering en weinig flexibiliteit (dijken en stormvloedkeringen). Deze paragraaf.
Maximale scenario: 85 cm/eeuw en 10% toename wind	Toepassen bij reservering van ruimte (zie paragraaf 2.4.3).

Tabel 2-5: Scenario's 3<sup>e</sup> Kustnota. Bron: RWS (2000).

Voor het project Zwakke Schakels Noord-Holland is gekozen voor het middenscenario; een toeslag van 30 cm (voor het zichtjaar 2050, zie Tabel 2-4). De keuze voor dit scenario wijkt af van de keuze voor harde waterkeringen, waarin een conservatiever scenario wordt gekozen. In de leidraad Zandige Kust wordt een eventuele keuze voor het middenscenario als volgt beargumenteerd:

*"Zolang de mogelijke gevolgen van het te ontwikkelen beleid nog niet, of nog maar ten dele, bekend zijn, wordt het vooralsnog afgeraden om consequent en systematisch van tamelijk 'pessimistische' aannamen uit te gaan".*

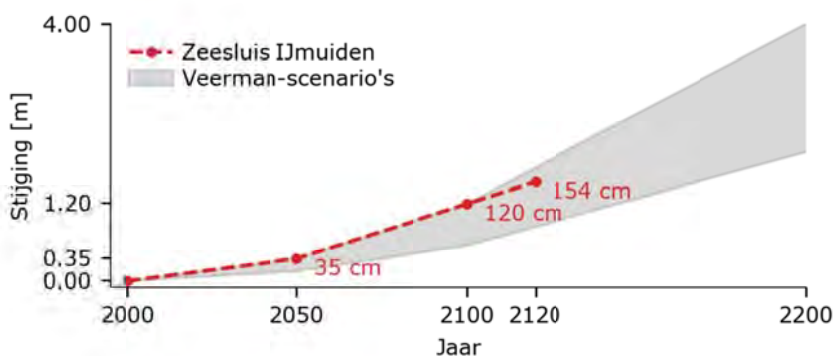
Het ontwerp van zachte keringen verschilt van het ontwerp van harde keringen, omdat zachte keringen gemakkelijker uitbreidbaar zijn (denk aan zandsuppleties). Binnen het OI2014 mag er voor het ontwerp van uitbreidbare keringen gekozen worden voor het gematigdere G-scenario. De aanbeveling uit de Leidraad Zandige Kust verschilt daarom niet zoveel van de huidige werkwijze in het ontwerpinstrumentarium.

## Maasvlakte 2

Bij de aanleg van de zeewering van Maasvlakte 2 begin deze eeuw lijkt het midden scenario uit de 3<sup>e</sup> Kustnota te zijn gebruikt. In het noordwesten van Maasvlakte 2, waar schepen via de vaargeul de haven van Rotterdam binnenlopen en de ruimte voor een zeewering dus beperkt is, beschermt een harde zeewering het nieuwe havengebied. De harde zeewering van Maasvlakte 2 heeft een kruinhoogte van circa 14 meter +NAP. De zeewering is ontworpen op omstandigheden die statistisch gezien gemiddeld eens in de 10.000 jaar voorkomen. Hierbij is rekening gehouden met een stijging van de zeespiegel voor de komende vijftig jaar van 0,30 m, wat overeenkomt met het midden scenario uit de 3<sup>e</sup> Kustnota. Voor de opvolgende periode van 50 jaar is er ruimte gereserveerd om de kruin van de zeewering nog eens met 0,50 m te verhogen (het ontwerp is dus uitbreidbaar!).

## Niet-vervangbare kunstwerken

Naast harde en zachte keringen zijn er ook nog de niet-vervangbare kunstwerken, die niet of nauwelijks aan te passen zijn. Denk hierbij aan de Maeslantkering. Voor deze kunstwerken wordt met de bovengrens van het Veerman-scenario gerekend (Deltacommissie, 2008). Bij het ontwerp van de zeesluis IJmuiden, met als zichtjaar 2120, is hier gebruik van gemaakt (RWS, 2014). Zo is uitgegaan van een zeespiegelstijging van 1,20 m in 2100 ten opzichte van 2000. Voor de jaren na 2100 wordt lineair geëxtrapoleerd, wat niet geheel conform de Veerman-scenario's is. Figuur 2-5 geeft de Veerman-scenario's en het voor de zeesluis IJmuiden gekozen scenario weer.



Figuur 2-5: Zeespiegelstijging volgens de Veerman-scenario's met daarin de voor de zeesluizen van IJmuiden gebruikte stijging.

### 2.3.2 Lange termijn waterhuishouding

Rijkswaterstaat voert verkenningen uit voor de situatie na 2050. Een voorbeeld hiervan is de inrichting van het merengebied na 2050. Hiervoor zijn schattingen van de zeespiegelstijging gemaakt voor de periode 2150-2175. Deze getallen zijn zeer onzeker en er is behoefte aan eenduidige indicatoren voor deze voorspelhorizon.

Een voorbeeld van een verkennende studie is het ISWP-project (Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied). Dit project bestudeert de effecten van het peilbeheer van het IJsselmeer en Markermeer op de waterveiligheid in de periode tot 2175. Deze periode is gekozen omdat dit 3 ontwerpcycli van 50 jaar zijn. In de integrale studie wordt ook de zoetwatervoorraad meegenomen; dit is direct gerelateerd aan het te kiezen streefpeil. Met behulp van het model DEZY is de statistiek van extreme meerpeilen bepaald, waarna voor elke peilbeheervariant de kosten van de waterveiligheid kunnen worden bepaald. Op deze manier kan een kosteneffectieve strategie voor ontwerp en waterhuishouding worden bepaald, met als randvoorwaarde de stijgende zeespiegel en de met het klimaat veranderende neerslaghoeveelheid. Binnen het ISWP-project wordt voor de zeespiegel gerekend met het W+ scenario, wat vervolgens wordt geëxtrapoleerd tot 2175. De zeespiegel zelf wordt gebruikt om te bepalen wat de pompcapaciteit moet zijn om het meerpeil te kunnen beheersen.

Tot op heden is de maximale ontwerplevensduur van infrastructuur ongeveer 100 jaar. Rekening houdend met een ontwerptraject leidt dit tot een zichtperiode van iets langer dan 100 jaar. Tot nu toe is er daarom alleen behoefte geweest aan zeespiegelgetallen voor een periode van maximaal, zeg, 110 jaar vooruit. Voor de bovengenoemde verkenningen is wel behoefte aan een eenduidige indicator voor een langere horizon.

### 2.3.3 Samenvatting en discussie

Binnen het ontwerp wordt voor de voorspelling van de zeespiegel gebruik gemaakt van klimaatscenario's, omdat de ontwerpduren te lang zijn om van statistische extrapolatie o.b.v. gemeten waterstanden uit te gaan. Welk scenario er gebruikt wordt hangt af van twee factoren:

- Het jaar waarin het ontwerp gemaakt is en de beschikbare klimaatscenario's in dat jaar;
- De uitbreidbaarheid en/of vervangbaarheid van een kering. Zo is het voor een duin minder erg dat deze 'te laag' is dan voor een dijk of een zeesluis, omdat de eerste gemakkelijker en sneller versterkt kan worden.

Voor harde waterkeringen wordt een ontwerp toeslag volgens het W+ scenario gedefinieerd. In het project Zwakke Schakels Noord-Holland is het middenscenario uit de Leidraad Zandige Kust toegepast. Bij de zeesluis IJmuiden is de bovengrens van het Veerman-scenario gebruikt.

De eenduidigheid van de indicatoren die in het ontwerp gebruikt worden is voor verbetering vatbaar. De huidige methode die door het OI2014 wordt aangeraden, lineaire interpolatie tussen de scenariowaarden, is duidelijk. Wel worden de KNMI'06- en Deltascenario's door elkaar gebruikt. Dat is niet correct, want de referentie jaren verschillen. Daarnaast wordt de ontwerp toeslag gecorrigeerd met de reeds waargenomen zeespiegelstijging, zodat er een mix van metingen en scenario's ontstaat.

Een ander aandachtspunt is de maat voor de zeespiegel. De klimaatscenario's gaan uit van gemiddelde zeewaterstanden. Ontwerp gaat uit van extreme condities en dus is de gemiddelde hoogwaterstand wellicht relevanter. Dit sluit ook beter aan op de beoordeling van de primaire waterkeringen.

Al met al is het oordeel gerechtvaardigd dat de in het OI2014 (Deltares, 2014) voorgeschreven methode voor het ontwerp van waterkeringen bruikbaar is voor de toepassing 'ontwerp'. Dit komt voor harde waterkeringen neer op lineair interpoleren binnen het conservatieve scenario (W+) en voor uitbreidbare keringen eventueel het G-scenario. Dit is met de huidige kennis een voldoende geraffineerde aanpak. De vermenging van scenario's en metingen is af te raden. De verwachting is dat in de nabije toekomst kansen worden gekoppeld aan klimaatscenario's. Onze aanbeveling is om de resulterende kansverdeling voor de zeespiegelstijging te gebruiken. Dit biedt meer flexibiliteit bij het bereiken van een ontwerp met minimale kosten.

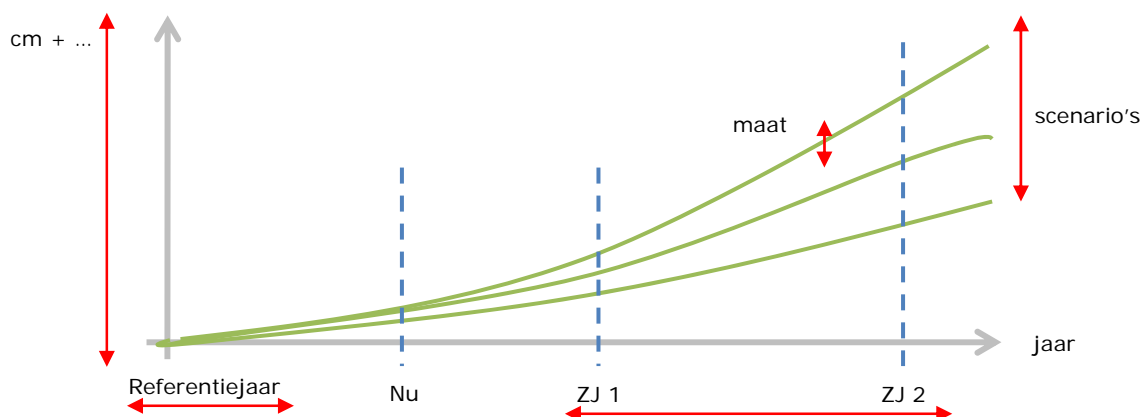
Verder blijkt uit de praktijk dat steeds meer flexibele / adaptieve ontwerpen met een korte levensduur worden gemaakt (vaak vanwege de kosten). Aan de andere kant zijn aannemers langer verantwoordelijk voor het beheer en onderhoud van ontwerpen (DBFM-contracten). Het is daarom noodzakelijk om een continue curve van de zeespiegelindicator te hebben. Dat is, voor iedere ontwerpduur een zeespiegelgetal.

Over het algemeen is voor ontwerp van waterkeringen (incl. kunstwerken) behoefte aan een zeespiegelgetal voor maximaal 100-110 jaar vooruit. In verkenningen is soms behoefte aan zeespiegelgetallen voor meer dan 100 jaar vooruit.

Kenmerken zeespiegelindicator voor ontwerp	
Naam	Absolute stijging zeespiegel (in cm)
Definitie	Deltascenario's / Klimaatscenario's
Type	Gemiddelde waterstand
Toepassing	Ontwerp (ontwerpinstrumentarium)
Oorsprong	KNMI
Context	OI2014
Instituut	KNMI, IPCC
Programma	Deltaprogramma
Status	Wordt toegepast bij ontwerp. Er is geen consensus.
Wie gebruikt het?	Ontwerpers
Verantwoording getalswaarde	Scenariowaarde (fysische analyses) via IPCC scenario's

### Klimaatscenario's

Uit de lijst met beschikbare klimaatscenario's blijkt dat het niet altijd duidelijk is wat het referentiejaar is. Om tot een herleidbaar ontwerp te komen is het van groot belang dat bij het gebruik van klimaatscenario's duidelijk is hoe de indicator tot stand is gekomen. Referentiejaar, zichtjaar, klimaatscenario, maat, etc. moeten daarom duidelijk zijn vastgelegd. Figuur 2-6 geeft een overzicht van de variabelen waarbinnen een zeespiegelindicator in de context van klimaatvoorspellingen dient te worden geformuleerd.



Figuur 2-6: Variabelen voor het aangeven van zeespiegelstijging. ZJ = zichtjaar.

Zeespiegelstijging wordt gewoonlijk gegeven als X tot Y cm in 2050. Hierin zijn de variabelen zichtjaar en scenario aanwezig. Het zichtjaar is 2050 en de scenario's komen voort uit de gegeven bandbreedte. Een belangrijk gegeven hierbij is het referentiejaar: X centimeter verschil ten opzichte van de stand in welk jaar? Daarnaast zal er bij klimaatscenario's over het algemeen over een absolute stijging gesproken worden, omdat de gegevens afgeleid zijn van wereldwijde scenario's. Het KNMI vertaalt dit naar lokale scenario's waarbij de bodemdaling ook meegenomen zou kunnen worden. Als laatste variabele is er nog de maat waarmee gemeten wordt: gaat het om de gemiddelde zeewaterstand of bijvoorbeeld het gemiddelde hoogwaterpeil? Ten slotte is bij het gebruik van een scenario ook de kans op dit scenario van belang (indien gedefinieerd).

## 2.4 Planvorming

Als laatste categorie wordt planvorming in de zin van ruimtelijke ordening beschouwd. Dit is een brede categorie met vele toepassingsgebieden, die van verschillende zeespiegelindicatoren gebruik kunnen maken. In deze verkenning wordt gezocht naar een overkoepelende zeespiegelindicator voor ruimtelijke ordening en ontwikkeling.

### 2.4.1 Indicator “percentage onder zeeniveau”

In ruimtelijke-ordeningsvraagstukken speelt de vraag waar we kunnen wonen, bouwen en verbouwen. Vaak wordt Nederland geprezen omdat we ons in staat hebben gesteld om te kunnen wonen onder de zeespiegel (bijv. OECD, 2014).

De bijbehorende indicator die in gebruik is, is het “percentage van Nederland dat onder zeeniveau ligt”. Meestal wordt gesteld dat meer dan de helft van Nederland onder zeespiegel ligt (bijv. RWS, 2016, Koenders, 2015; OECD, 2014). Dit percentage is al geruime tijd in gebruik (bijvoorbeeld Prillewitz, 1966). Het is echter niet correct.

Dat dit percentage niet correct is, bleek toen het in het IPCC (2007) rapport terecht kwam en dit rapport grondig werd gecontroleerd (Vrij Nederland, 2010). Het PBL, die de bijdrage had geleverd aan de IPCC, schreef een correctie (PBL, 2010). In de correctie staat dat het percentage van Nederland onder zeespiegel niet 55% maar 26% had moeten zijn. Eigenlijk had het PBL “het percentage van Nederland dat gevoelig is voor overstromingen” bedoeld; dit is wel 55%.

Welk percentage precies onder de zeespiegel ligt is nu nog steeds niet duidelijk. Bij de uitleg van de minister in de Tweede Kamer antwoordde ze met de constatering “Van Nederland ligt 26% beneden zeeniveau”, “Zeeniveau is het gemiddelde hoogwaterpeil” en dat (als men uit gaat van) “genormaliseerd Amsterdams peil (NAP) dan geldt dat 22% van Nederland ligt onder dit NAP.” (Cramer, 2010). Ongeacht of de 26% nou relatief is ten opzichte van NAP of gemiddeld hoogwater, de vraag blijft nog steeds welk deel van Nederland onder de zeespiegel (gemiddelde huidig zeeniveau) ligt.

Wat misschien wel de belangrijkste conclusie van deze indicator is, is dat afgezien van het gebruik in internationale profilering de indicator niet tot daadwerkelijke actie leidt. Nadat is vastgesteld dat we het deel van Nederland onder water jarenlang systematisch een factor 2 te hoog hebben ingeschat heeft niemand moeten verhuizen naar hoger gelegen gebied. De indicator heeft dus vooral een symbolische en representatieve waarde.

Kenmerken zeespiegelindicator voor planvorming	
Naam	Percentage Nederland onder zeespiegel
Definitie	Onduidelijk
Type	Gemiddelde waterstand
Toepassing	Representatie, Profilering
Oorsprong	Onduidelijk
Context	IPCC 2007
Instituut	IPCC, PBL
Programma	Geen
Status	Wordt gebruikt in diverse toespraken, publicaties en rapportages
Wie gebruikt het?	Watermanagers, representanten
Verantwoording getalswaarde	Deel van AHN onder een referentiewaarde (referentiewaarde is inconsistent geformuleerd).

## 2.4.2 Vrije ruimte

In de 3<sup>e</sup> Kustnota staat dat extra ruimte moet worden gereserveerd voor uitbreiding van de kustbescherming. Het gaat hier om het opnemen van een reservestrook (een planologische reservering) voor 200 jaar zeespiegelstijging in de leggers van waterschappen. Hierbij wordt uitgegaan van een pessimistisch scenario: 85 cm/eeuw zeespiegelstijging en 10% toename wind. De waterschappen houden op die manier rekening met ruimte om de gevolgen van zeespiegelstijging op te vangen. Dit kan bijvoorbeeld door de waterkering te verbreden. De 3<sup>e</sup> Kustnota stelt verder strenge voorwaarden aan bebouwing langs de kust. Zo moet rekening worden gehouden met de planologische reservering, zijn harde elementen in de afslagzone en reserveringsstrook die het wezen van de flexibele kust aantasten niet toegestaan en mag nieuwe bebouwing geen belemmering vormen voor het proces van afslag. Dit is onlangs nog eens bekrachtigd in het voorlopige Kustpact.

De waterschappen hebben het begrip reserveringszone (ook wel vrijwaringszone genoemd) hernoemd naar "profiel van vrije ruimte" en gesteld dat dit het deel van de zone is dat "naar het oordeel van de beheerder nodig is voor toekomstige verbeteringen". Hierbij is expliciet de definitie van de zeespiegelstijging losgelaten (Unie van Waterschappen, 2013).



Figuur 2-7: Profiel van de vrije ruimte. Bron. [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl).

## 2.4.3 Ruimtelijke ontwikkeling

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) verkent ruimtelijke ontwikkelingen in het heden en de toekomst. Een belangrijk onderdeel hiervan is het maken van scenario's om deze ontwikkelingen te kunnen beschrijven. Het PBL maakt niet alleen scenario's, het biedt ook een handreiking voor het maken van scenario's. In deze handreiking (Scenario's maken voor milieu natuur en ruimte een handreiking, PBL 2013) wordt ook gesproken over het verwerken van klimaatverandering in scenario's. De Deltascenario's worden genoemd als de Nederlandse klimaatscenario's voor de komende eeuw.

De Deltascenario's uit het Deltaprogramma komen voort uit de klimaatscenario's van het KNMI (2006). Het KNMI geeft een redelijk concrete handleiding over het gebruik van de scenario's. Hun advies over welk scenario te gebruiken binnen de context van een onderzoek (tijdshorizon, gebied en doel) staat op de KNMI-website (<http://www.klimaatscenarios.nl/gebruik/index.html>).

Uit de website volgt dat voor ruimtelijke ontwikkelingen binnen Nederland voor de periode 2030-2100 één of meerdere KNMI'14 klimaatscenario kunnen worden gebruikt. De specifieke keuze voor scenario's is afhankelijk van het precieze doel (oriëntatie, impact en adaptatie, beleid). Voor ieder scenario is een bepaalde stijging van de zeespiegel gedefinieerd. Net als bij 'Ontwerp' is het van belang om het referentiejaar, de zichtjaren en de maat van de zeespiegelstijging goed te definiëren.

### **Voorbeeldtoepassing zeespiegelstijging in ruimtelijke ontwikkelingen**

Specifieke toepassingen van bovenstaande scenario's in ruimtelijke ordening zijn nog niet talrijk. Het is niet zo dat mensen gestimuleerd worden om in hoger gelegen gebieden te gaan wonen. Wel houden lokale en regionale overheden bij nieuwbouw in zekere zin rekening met de zeespiegelstijging.

Als voorbeeld noemen we het Zuid-Hollands beleidskader voor buitendijks bouwen. De provincie Zuid-Holland vindt het belangrijk om in te spelen op het toenemende gebruik van buitendijks gebied en de waterveiligheidsaspecten die daarbij komen kijken. Daarom heeft de provincie een beleidskader ontwikkeld voor buitendijks bouwen. Het beleid voorziet in een verplichting aan gemeenten om in bestemmingsplannen voor buitendijkse gebieden een inschatting te maken van het slachtofferrisico van een eventuele overstroming en duidelijk te maken hoe met dat risico wordt omgegaan. Bij het maken van die inschatting kunnen gemeenten gebruikmaken van een speciaal voor dit doel ontwikkelde risicomethodiek, waarmee zij waterveiligheidsrisico's kunnen bepalen en maatregelen kunnen afwegen. Via de online Risico Applicatie Buitendijks (RAB) is de methodiek voor alle Zuid-Hollandse gemeenten goed toegankelijk.

Het RAB is in eerste instantie bedoeld voor het meewegen van hoogwaterrisico's in het ruimtelijk ontwerp bij nieuwe ontwikkelingen en herstructureringen. Daarom vraagt de provincie dat een bestemmingsplan dat nieuwe bebouwing mogelijk maakt, een inschatting bevat van het slachtofferrisico en hoe daarmee wordt omgegaan. Het slachtofferrisico bij een overstroming van het buitendijkse gebied wordt bij woonfuncties ingeschat op basis van te verwachten waterstanden voor het jaar 2100. Hierbij is uitgegaan van een absolute zeespiegelstijging van 85 cm (t.o.v. het jaar 2000, Deltascenario!).

De provincie Flevoland heeft een soortgelijk beleid voor buitendijkse ontwikkelingen gemaakt. Daarnaast nemen steeds meer provincies overstromingsrisico's (binnen- en buitendijks) in hun ruimtelijke structuurvisies op.

### **2.4.4 Samenvatting en discussie**

We concluderen dat de zeespiegelindicator "percentage van Nederland onder zeespiegel" losjes gebruikt wordt, zonder daadwerkelijke gevolgen. De reserveringszone aan de kust was aanvankelijk direct gerelateerd aan een scenario van de zeespiegel, maar deze koppeling is later losgelaten. De zeespiegelstijging komt expliciet voor in de beoordeling van ontwikkelingen in buitendijks gelegen gebied op waterveiligheid. We concluderen dat in ieder geval in deze voorbeelden de huidige en toekomstige stand van de zeespiegel wel invloed hebben op hoe we

met onze ruimte omgaan. De indicatoren worden gebruikt ter verantwoording en initiatie van beleid.

Er is geen sprake van een zogenaamde "evidence based" praktijk. De genoemde indicatoren worden nog niet gebruikt om een kostenefficiënte afweging te maken van de optimale inrichting van de ruimte.

We adviseren om de indicator "percentage van Nederland onder zeeniveau" eenduidig en gekoppeld aan de stand van de gemiddelde zeespiegel te definiëren en uit te rekenen. Werk toe naar een consistent gebruik van indicatoren en de bijbehorende reservering van ruimte in ruimtelijke-orderingsvraagstukken.



## 3 Synthese en aanbevelingen

### 3.1 Samenvatting

Op dit moment hebben slechts enkele experts het overzicht over welke zeespiegelindicator voor welke toepassing wordt gebruikt en waarom. Om de kennis breed toegankelijk te maken is in dit rapport een overzicht opgesteld van de verschillende zeespiegelgetallen die op dit moment in gebruik zijn in het kader van de toepassingen beheer en onderhoud kust, toetsing, ontwerp, en planvorming, voornamelijk binnen het beleidsterrein waterveiligheid. Er is nagegaan welke factoren er wel en niet inzitten, welke definities gehanteerd worden en hoe de cijfers zich tot elkaar verhouden.

Het suppletievolume in het suppletieprogramma Kustlijnzorg is tot op heden gebaseerd op de actuele trend in de relatieve jaargemiddelde zeewaterstand langs de kust. Dit is een eenduidige indicator waarvoor de berekeningswijze in de Zeespiegelmonitor is opgenomen. Dit biedt de mogelijkheid om de actuele trend regelmatig opnieuw te bepalen. In 2017 voeren RWS, Deltares en HKV onderzoek uit naar de regionale verschillen in de zeespiegel en bodemdaling. In 2020 neemt DGRW opnieuw een beslissing over het suppletievolume. Ter ondersteuning van deze beslissing voert het Kustgenese 2.0 programma een studie uit naar de accommodatieruimte die wordt gecreëerd door 'absolute zeespiegelstijging minus bodemdaling'.

Voor de vergunningsverlening delfstoffenwinning is een vergelijkbare zeespiegelindicator in gebruik. Deze veronderstelt naast een lineaire trend ook een versnelling in de relatieve zeespiegelstijging.

De indicator voor de beoordeling van primaire waterkeringen is een toeslag op de getijhoogwaterstijging. Deze toeslag is gebaseerd op een mix van gemeten en trendmatige (relatieve) regionale hoogwaterstijging, waarbij 1985 het referentiejaar is. De indicator is eenduidig en de methode is goed gedocumenteerd. De vraag is of het verstandig is om de toeslag te baseren op de lineaire trend in de hoogwaters. De trend is immers mogelijk geen goede voorspeller voor de huidige hoogwaterstijging (en de trend in de gemiddelde waterstand wel).

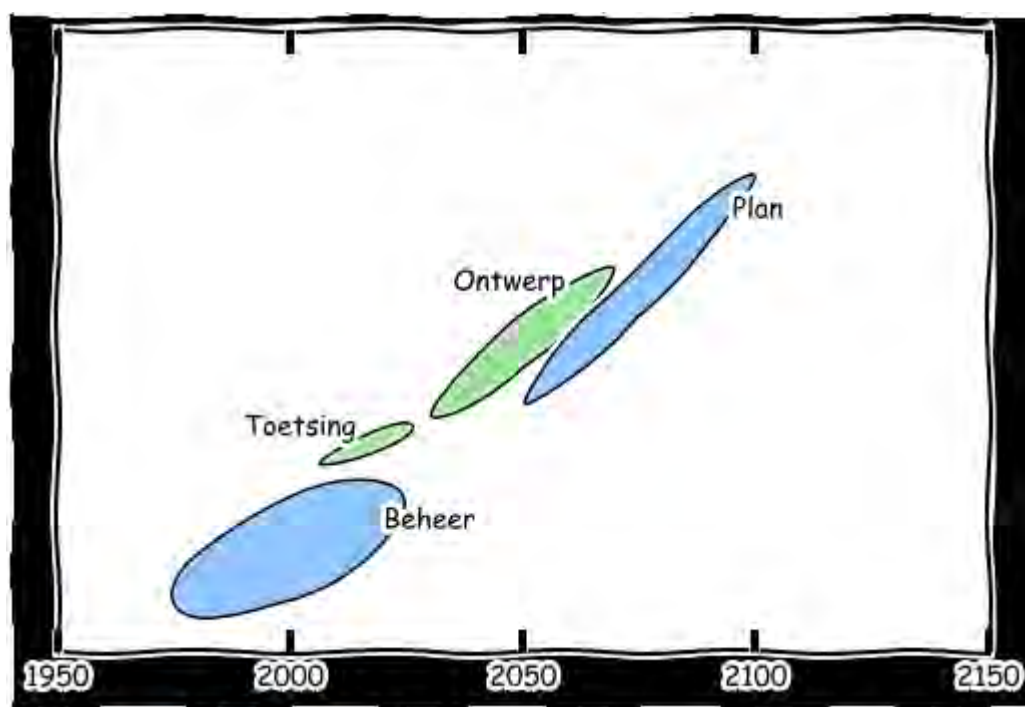
Voor het ontwerp van waterkeringen is een breed scala aan scenario's in gebruik; voor harde waterkeringen, zachte waterkeringen, niet-uitbreidbare ontwerpen en voor niet-vervangbare constructies. De scenario's gaan uit van absolute stijging van de gemiddelde zeespiegel. Dit wijkt in twee opzichten af van de gebruikte indicator voor de toetsing (absoluut vs. relatief en gemiddelde waterstand vs. hoogwaterstand). De referentiejaar van de scenario's zijn hierbij niet altijd even duidelijk en soms is ook de gemeten zeespiegelstijging verwerkt in de scenario's.

Op hoofdlijnen zijn twee zeespiegelindicatoren in 'omloop' op het gebied van (ruimtelijke) planvorming. De zeespiegelindicator "percentage van Nederland onder zeespiegel wordt veelal als communicatiemiddel gebruikt, maar heeft geen gevolgen voor het beleid. Een eenduidige methode om de indicator te bepalen is nog niet opgesteld. Verschillende onjuiste waarden zijn in de publiciteit gekomen.

Net als bij ontwerp worden klimaatscenario's met een absolute zeespiegelstijging gebruikt in analyses en verkenningen. De reserveringszone aan de kust was aanvankelijk direct gerelateerd aan een scenario van de zeespiegel, maar deze koppeling is later losgelaten. Een concreet voorbeeld van een toepassing is het Zuid-Hollands beleidskader voor buitendijks bouwen, waarin slachtoffersrisico's in 2100 op basis van 85 cm zeespiegelstijging worden bepaald.

	Beheer	Toetsing	Ontwerp	Planvorming
Indicator	Huidige trend	Huidig	Stand bij einde levensduur	Percentage Nederland onder zeeniveau
Maat	Gemiddeld	Hoogwater	Gemiddeld	Gemiddeld
Absoluut/relatief	Relatief	Relatief	Absoluut	n.v.t.

Tabel 3-1: Zeespiegelindicatoren in waterveiligheidsbeleid.



Figuur 3-1: Zichtjaren toepassingsgebieden zeespiegelstijging.

### Trends (ontwikkeling van indicatoren in de tijd)

Binnen de in dit rapport beschouwde indicatoren zijn duidelijke trends zichtbaar. Zo wordt er meer adaptief ontworpen en is degene die de waterkering / kunstwerk aanlegt ook voor langere tijd verantwoordelijk voor het onderhoud. Onderstaande tabel geeft de geobserveerde trends weer.

Voorheen	Nu
Statische ontwerpen	Adaptieve en/of uitbreidbare ontwerpen
Langere ontwerpduur	Kortere ontwerpduur
B&O gescheiden van ontwerp	DBFM-contracten (Design Build Finance and Maintain): aannemers zijn niet alleen verantwoordelijk voor ontwerp, maar ook voor onderhoud over een bepaalde duur.
Robuust ontwerp	Kosteneffectief ontwerp (voorzorgsbeginsel)

### **Behoeftte aan eenduidige indicatoren voor de middellange termijn**

Het is wenselijk om een continue verband tussen indicatoren voor de korte en lange termijn te hebben. Op deze manier wordt er aan de behoefte van zowel B&O als ontwerp voldaan.

Op basis van de expertsessie en de uitwerking van de indicatoren blijkt dat indicatoren voor de middellange termijn ontbreken. Tot op het heden wordt binnen de onderzochte toepassingsgebieden met voorspellingen voor de korte termijn gerekend (5-10 jaar vooruit) en voor andere met veel langere termijnen (50-100 jaar vooruit). In het beheer en onderhoud gaat men momenteel toe naar ontwerpen waarbij men een beeld wilt hebben van de ontwikkelingen op middellange termijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de Zandmotor waarbij men wil weten hoe die zich langs de Nederlandse kust gaat verplaatsen. In het ontwerp is echter een trend zichtbaar naar ontwerpen met zichtjaren van bijvoorbeeld 25 jaar, omdat de onzekerheden op lange termijn zo groot zijn dat een ontwerp voor een periode van 50 jaar hoogstwaarschijnlijk niet kosteneffectief is. Deze twee toepassingen groeien dus naar elkaar toe en dus ontstaat de behoefte aan eenduidige indicatoren op de middellange termijn.

Dit vraagt dus om een betere aansluiting van zeespiegelindicatoren voor de korte en lange termijn.

## **3.2 Aanbevelingen**

### **Beheer en onderhoud kust**

Het zou goed zijn als DGRW/RWS de actuele trend in de zeespiegelstijging iedere 5 jaar laat bepalen via de Zeespiegelmonitor.

Een tweede aanbeveling aan DGRW/RWS is het laten onderzoeken of de accommodatieruimte gecreëerd door de relatieve zeespiegelstijging een goede indicator is voor de suppletiebehoefte.

### **Toetsing**

Voor de toetsing is het relevant om te onderzoeken of de trend in de hoogwaterstijging een goede voorspeller is voor de huidige hoogwaterstand. Deltares en HKV kunnen dit gezien hun kennis op dit onderwerp in de aanloop naar WBI2023 het beste samen oppakken.

### **Ontwerp**

Om tot een herleidbaar ontwerp te komen wordt aanbevolen om bij het gebruik van klimaatscenario's duidelijk aan te geven hoe de indicator kan worden gereproduceerd. Aan KNMI en Deltaprogramma is het advies dus om het klimaatscenario, het referentiejaar, het zichtjaar, de maat, etc. duidelijk vast te leggen en de totstandkoming van de getallen te documenteren.

Degenen die een klimaatscenario toepassen moeten de indicator duidelijk (kunnen) formuleren. Bijvoorbeeld als volgt: "De zeespiegelstijging is [aantal] centimeter in [zichtjaar], ten opzichte van [referentiejaar]. Het gaat hierbij om de [absolute / relatieve] stijging van het [maat] ten opzichte van [verticaal referentieniveau].".

Onze aanbeveling aan RWS is om de in het OI2014 (Deltares, 2014) voorgeschreven methode voor het ontwerp van waterkeringen te blijven volgen bij de aanleg van nieuwe constructies. Dit komt neer op lineair interpoleren binnen het conservatieve scenario (W+) voor harde waterkeringen en eventueel het G-scenario voor uitbreidbare keringen. Dit is met de huidige

kennis een voldoende geraffineerde aanpak, maar het vermengen van metingen (waargenomen stijging) en scenario's is af te raden. Neem dit mee in de actualisatie van het OI2014 met KNMI'14 scenario's.

De tweede aanbeveling aan KNMI en RWS is het toekennen van een kansverdeling aan klimaat-scenario's en voor het ontwerp van de kansverdeling gebruik te maken. Dit biedt meer flexibiliteit bij het bereiken van een kostentechnisch optimaal ontwerp.

Door langer vooruitziend beheer en meer adaptieve ontwerpen met een kortere levensduur is behoefte aan een temporeel dekkend kader van indicatoren:

- Gebruik voortschrijdende termijnen, ga niet naar het volgende mooie getal;
- Ontwikkel een continue curve;
- Er is behoefte aan voorspellingen langer dan 100 jaar vooruit (verkenningen).

Voor verkenningen met vragen in de vorm van "wat zijn de grenzen en keerpunten van het beleid" wordt vaak met extremere zeespiegelstijging gerekend (voorbeelden: 1.3 m in ISPW, 6 m in Kwadijk et al. 2007). Een manier om op een hoge waarde uit te komen is om de voorspellingen verder door te trekken, tot ver voorbij 2100. Waar het doen van verkenningen van de grenzen van beleid nuttig en noodzakelijk is, heeft het oprekken van de zichtperiode naar een tijdperk waar de ontwikkelingen van de bevolking en technologie niet meer kunnen inschatten weinig waarde. Ons advies is daarom om met scenario's tot 100 jaar vooruit te rekenen en voor verkenningen in de vorm van grenzen en keerpunten met niet-gedateerde waarden te rekenen.

### **Planvorming**

Het is belangrijk om uit te zoeken wat het percentage van Nederland is dat onder de zeespiegel ligt. Dit getal kan vervolgens eenduidig worden uitgedragen door verschillende instanties, zodat er geen foutieve uitspraken worden gedaan. Dit percentage zou elke 5 jaar opnieuw berekend moeten worden, zodat de trend in kaart wordt gebracht. Het is aan te bevelen deze opgave aan de zeespiegelmonitor toe te voegen.

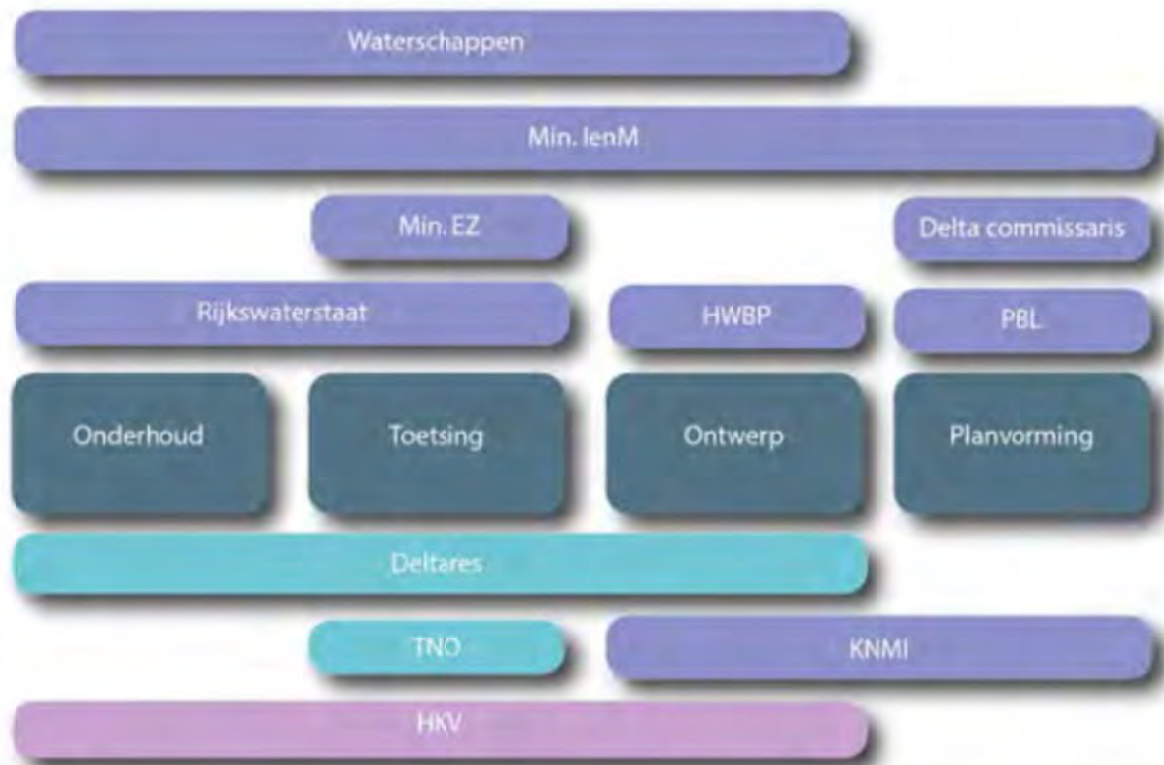
### **Waddenzee**

Er is een rijke diversiteit aan ministeries en instanties bezig met de verschillende indicatoren die belangrijk zijn voor de Waddenzee, en specifiek het winnen van delfstoffen. Het is logisch als er één ministerie is dat zich hier mee bezig houdt en niet meerdere. Het zou logisch kunnen zijn dat één van de Toegepast Onderzoek Organisaties de indicator afleidt.

### **Algemeen**

Een schematisch overzicht van de bij zeespiegelonderzoek betrokken organisaties (commissies en universiteiten buiten beschouwing gelaten) is te vinden in Figuur 3-2.

We zien dat het er verschillende indicatoren ontwikkeld worden door verschillende instituten. Het advies is om de indicatoren gezamenlijk te ontwikkelen en de methode en resultaten in de zeespiegelmonitor op te nemen.



*Figuur 3-2: Verschillende partijen (leiblauw: overheid, aquamarijn: kennisinstituut, pruim: bedrijven) zijn betrokken bij zeespiegelonderzoek. De overlap met kolommen geeft de hoofdtaak aan van de organisatie. Bijvoorbeeld Rijkswaterstaat houdt zich vooral bezig met onderhoud en toetsing. PBL houdt zich vooral bezig met planvorming. De organisaties boven de rij met onderhoud, toetsing, ontwerp en planvorming houden zich vooral bezig met beleidsvorming. De organisaties onder de rij houden zich vooral bezig met onderzoek en advisering.*



## 4 Referenties

Baart et al. (2015)

Zeespiegelmonitor 2014. Fedor Baart, Robert Leander, John de Ronde, Hylke de Vries, Vincent Vuik en Robin Nicolai. Deltares rapport 1209426.202. Deltares, HKV en KNMI, 2015.

Baart et al. (2016)

Zeespiegel onderzoeksagenda. Fedor Baart, Henk Kooi en Vincent Vuik. Deltares rapport 1230046-000-ZKS-0001, Versie 0.2, 23 mei 2016, definitief.

Bruggeman et al. (2013)

Deltascenario's voor 2050 en 2100; *Nadere uitwerking 2012-2013*. Bruggeman, W. Dammers, E., Van de Born, G. J., Rijken, B. C. Van Bommel, B., Nabielek, K. Veersma, J. Van den Hurk, B., Polman, N. Lindenhof, V., Folmer, C., Huizinga, F., Hommes, S., & Te Linde, A. H. Deltares/PBL/LEI/CPB. Delft, 2013.

Chbab (2015).

Basisstochasten WTI-2017: Statistiek en statistische onzekerheid. H. Chbab. Deltares. December 2015.

Deltacommissie (2008)

Samen werken met water: een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst; bevindingen van de Deltacommissie 2008. URL <http://www.deltacommissie.com/doc/2008-09-03%20Advies%20Deltacommissie.pdf>. Deltacommissie, 2008.

Deltares (2014)

Werkwijze bepaling hydraulische randvoorwaarden ten behoeve van nHWBP 2014 projecten. Tech Rep. 1208992-000, Deltares.

Dillingh et al. (1993)

De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek. D. Dillingh, L. de Haan, R. Helmers, G.P. Können en J. van Malde. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Report DGW-93,023, 1993.

Dillingh et al. (2010)

Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Dillingh, D., Baart, F. en J. de Ronde. Rapport 1201993-002, Deltares, 2010.

Dillingh (2013)

Kenmerkende waarden Kustwateren en Grote Rivieren. D. Dillingh. Rapport 1207509-000, Deltares, 2013.

ENW (2015)

Advies rapporten zeespiegelmonitor. Expertisenetwerk Waterveiligheid (ENW). Advies aan het ministerie van Infrastructuur en Milieu dd. 4-12-2015. Kenmerk ENW-15-23

IPCC (2007)

Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104.

IPCC (2013)

Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution 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, 1535 pp.

Koenders (2016)

Toespraak van minister Koenders bij de GLACIER conferentie (in English), September 2015.

KNMI (2006)

Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. Scientific Report WR2006-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands.

KNMI (2014)

Climate Change scenarios for the 21st Century—A Netherlands perspective. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands.

Kwadijk et al. (2007)

Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding. Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het MNP-project "Nederland later". J. Kwadijk, S. van Vuren, G. Verhoeven (WL | Delft Hydraulics), G. Oude Essink, J. Snepvangers (TNO) en E. Calle (GeoDelft). Oktober 2007.

Kroos (1982)

Berekening slotgemiddelden 1981.0. Ing. J. Kroos. Ministerie van verkeer en waterstaat. Rijkswaterstaat. Directie waterhuishouding en waterbeweging. Nota nr. JK 82.14.

MinIenM (2014)

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken, 2013. Deltaprogramma 2014: Werk aan de delta. Tech. rep., Deltaprogramma Kust.

MinIenM (2015)

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken. Deltaprogramma 2015: Werk aan de delta. Tech. rep., Deltaprogramma Kust, 2014.

Mulder (2000)

Zandverlies in het Nederlandse kuststelsel, advies voor dynamisch handhaven in de 21e eeuw. Mulder, J.P.M. Rapport RIKZ/2000.36, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, 2000.

OECD (2014)

Water Governance in the Netherlands: Fit for the Future?, OECD Studies on Water, OECD Publishing. 2014

Nederbragt (2005)

Zandvoorraden van het Kuststelsel: onderbouwing van een conceptueel model met behulp van trends van de winst- en verliesposten over de periode 1973-1997. G. Nederbragt. Rapport RIKZ/2005.033, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, 2005.

PBL (2010)

Assessing an IPCC assessment. An analysis of statements on projected regional impacts in the 2007 report

PBL (2015)

Planbureau voor de Leefomgeving. Wetenschap en beleid verbinden. PBL, Den Haag, 2015.

Prillewitz (1966)

The interaction of social change and physical planning. Sociologia Ruralis December 1966.



- Rijnen, K. (2016)  
The Influence of Sea Level Rise Uncertainties on Flood Defence Design Considerations. MSc. Thesis, TU Delft, 2016.
- De Ronde (2008)  
Toekomstige langjarige suppletiebehoefte. J. de Ronde. Deltares rapport Z4582.24. Deltares, 2008.
- De Ronde et al. (2013).  
Zeespiegelmonitor. De Ronde, J., F. Baart, C. Katsman and V. Vuik. Deltares rapport 1208712-000, Deltares, HKV en KNMI, 2013.
- De Ruig (1995)  
De kust in breder perspectief. Basisrapport kustnota 1995. Joost de Ruig. Rapport RIKZ/95-005. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Februari 1995.
- RWS (2000)  
3<sup>e</sup> Kustnota: Traditie, trends en toekomst. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 2000.
- RWS (2007)  
Hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 2007.
- RWS (2014)  
Nota: Waterkering Zeetoeegang IJmond. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat, 2014.
- RWS (2016)  
Rijkswaterstaat klaar voor het stormseizoen 2016-2017. Nieuwsbericht, Oktober 2016.
- Stocker et al. (2013)  
Climate change 2013: The physical science basis. 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. Tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- TAW (2002a)  
Achtergronddocument inzake zeespiegelstijging en klimaatverandering met betrekking tot kustbeheer en kustbeleid. TAW werkgroep Kust, Augustus 2002.
- TAW (2002b)  
Leidraad Zandige Kust. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). DWW-2003-046. December 2002.
- TNO (2016)  
Advies "actualisering beleidsscenario zeespiegelstijging voor delfstofwinning onder de Waddenzee". Brief, TNO, 27 juni 2016.
- Unie van Waterschappen (2012)  
Modelkeur 2012, Unie van waterschappen 2013.
- V&W (2008)  
Nationaal Waterplan 2009-2015. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. Verkeer en Waterstaat, 2008.

Vrij Nederland (2010)

Nieuwe fout klimaatpanel ontdekt, Vrij Nederland, 3 Februari 2010.

De Vries et al. (2014)

Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways.

Vries, H. de, C. Katsman and S. Drijfhout. Environmental Research Letters 9 (11): 115007.

URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=11/a=115007>, 2014.

VROM (2004).

Nota Ruimte – Ruimte voor Ontwikkeling. Tech. rep., Ministeries van VROM, LNV, VenW en EZ. PKB Nationaal Ruimtelijk Beleid, 2004.

Telefonisch contact met Ad van der Spek. Oktober 2016.

<http://www.rws.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/kustonderhoud/index.aspx>

<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/programma'-projecten/beheer-onderhoud/>

## **Bijlage A: Verslag expertsessie**

# bespreekverslag

PR2695.30

Project : Zeespiegelstijging indicatoren  
Datum : 10-11-2016  
Onderwerp : Overleg voorlopige analyse zeespiegelindicatoren  
Opgesteld : Guus Rongen en Robin Nicolai (concept 17-11-2016; definitief 29-11-2016)  
Aanwezig : Carola van Gelder-Maas, Robert Vos, Jean-Marie Stam, Fedor Baart, Robin Nicolai,  
Deon Slagter, Guus Rongen, Ernst Lofvers, Marcel Bottema, Rena Hoogland  
Circuleren : aanwezigen

---

## Agenda

1. Voorstelronde en context
2. Inleiding verkenning zeespiegelindicatoren
3. Reacties B&O Kust en 'Toetsing'
4. Reacties Ontwerp en Planvorming
5. Synthese

### 1. Voorstelronde en context

Jean-Marie opent de vergadering en de aanwezigen stellen zich voor (zie onderstaande tabel). Vervolgens schetst ze de context, het project Zeespiegelmonitor, waarin de studie naar eenduidige indicatoren en deze expertsessie plaats vinden.

Naam	Organisatie	Rol / expertise / activiteiten
Carola van Gelder-Maas	RWS	Kustgenese en Zandmotor
Rena Hoogland	RWS	Kustgenese: bodemdaling
Deon Slagter	RWS	PL HR2017, ISTORM, ...
Marcel Bottema	RWS	Kwaliteitsborging o.a. onzekerheden WBI, ...
Robert Vos	RWS	OI2014, Ontwerprandvoorwaarden
Ernst Lofvers	RWS NN	Beheer Noord-Nederland, gas- en zoutwinning
Jean-Marie Stam	RWS	PL Zeespiegelmonitor RWS
Fedor Baart	Deltares	PL Zeespiegelmonitor Deltares
Robin Nicolai	HKV	PL Eenduidige zeespiegelindicatoren
Guus Rongen	HKV	Projectteam eenduidige zeespiegelindicatoren

### Aanleiding

De aanleiding van de studie Zeespiegelmonitor is het beheer en onderhoud van de kust door middel van zandsuppleties. ENW ziet de methode voor de bepaling van zeespiegelindicatoren (actuele stand en trend) uit de Zeespiegelmonitor 2014 (Baart et al., 2015) als goed geschikt voor kortetermijnbeslissingen m.b.t. zandsuppleties. Voor langere zichtjaren (ontwerp gebruik 50 tot 100 jaar) is dit statistische model wellicht niet representatief.

Een onderdeel van de Zeespiegelmonitor is Integratie met leidende vragen "Sluiten de verschillende toepassingen van de zeespiegel op elkaar aan en worden alle toepassingen afgedekt?". Binnen dit onderdeel wordt gewerkt aan de integratie van bodem- en zeespiegelindicatoren alsmede aan een aanbeveling voor het gebruik van eenduidige indicatoren. Het laatste gebeurt vanwege het feit dat de zeespiegelindicatoren die in het Nederlandse beleid worden gebruikt onderling niet consistent zijn, waardoor onduidelijkheden ontstaan.

## Doel

Deon vraagt door wat nu precies het doel van het project is, "Wat wil Den Haag met deze studie?"  
Rena: in de derde kustnota werd de zeespiegelstijging mooi in een tabel bij elkaar genoemd.  
Vervolgens zijn de verschillende toepassingen weer uit elkaar gegroeid. Het zou goed zijn als er een integraal kustbeleid komt waarin de voor verschillende toepassingen gebruikte indicatoren op eenduidige wijze worden vastgesteld.

Het hoofddoel van het project "Eenduidige zeespiegelindicatoren" is dus het onderbouwen en vastleggen van eenduidige indicatoren en een bewuste keuze waarvoor deze te gebruiken. Momenteel lopen de zichttermijnen nog redelijk uiteen en het lukt (nog) niet om de methoden aan elkaar te knopen. Verschillende indicatoren zijn geschikt en worden gebruikt. Door de veranderende focus in het programma Kustgenese (meer gericht op de lange termijn, 50-100 jaar vooruit, denk hierbij aan de Zandmotor) en het feit dat ontwerpen wellicht efficiënter zijn voor kortere durven vanwege de grotere onzekerheden, zou er meer behoefte aan eenzelfde indicator kunnen ontstaan.

Marcel geeft aan dat voor een relatieve zeespiegelstijging ook kennis nodig is over de bodemdaling, naast de klimaatscenario's. Ook stelt hij "Eenduidig waar het kan" in plaats van "Eenduidig ten koste van alles".

## **2. Inleiding verkenning zeespiegelindicatoren**

Robin presenteert de 70%-versie van het rapport over eenduidige zeespiegelindicatoren. Hij maakt onderscheid tussen toepassingen binnen 4 beleidsterreinen: Beheer en onderhoud Kust, wettelijke beoordeling, ontwerp en ruimtelijke planvorming. De tijdens de presentatie gemaakte opmerkingen zijn hieronder samengevat per beleidstoepassing:

### Beheer en onderhoud Kust

-

### Beoordeling waterkeringen

Robert Vos over het referentiejaar 1985. Alle (hoog)waterstanden worden eerst naar 1985 vertaald. Vervolgens wordt van deze homogene reeks statistiek afgeleid. De gebruikte toeslag is die voor de getijhoogwaterstijging.

Om aan te tonen dat zeespiegelindicatoren niet altijd eenduidig zijn, vertelt Robin dat in het (nieuwe) toetsinstrumentarium (WBI) een dubbel telling in de zeespiegelstijging is geconstateerd. Deon: de dubbel telling was aanwezig in beide softwarepakketten (Hydra-NL en Hydra-Ring) en is er in beide pakketten uitgehaald. Dit probleem is dus opgelost.

Essentie. Bij de beoordeling van de waterkeringen wordt geen klimaatscenario gehanteerd, maar wordt alleen gekeken of het toevoegen van extra meetjaren leidt tot andere belastingen aan de kust. Als dit het geval is, wordt de gemeten trend voortgezet tot aan het einde van de beoordelingsperiode.

Robert Vos zegt dat verandering van het NAP-vlak een extra moeilijkheid is in de bepaling van absolute en relatieve zeespiegelstijging.

### Ontwerp (harde keringen)

De afleiding van de 48 cm zoals gepresenteerd lijkt te kloppen in de ogen van Robert Vos. Hij zegt dat tegenwoordig ook met andere scenario's wordt ontworpen: voor kortere zichtjaren mag ook met een G-scenario ontworpen worden, zoals vermeld in het OI (ontwerpinstrumentarium).

Tot slot merk Robert op: normaal zou je bij het gebruik van een scenario met onzekerheden rekenen, omdat dit niet kan bij ontwerp wordt hier met de bovengrens gerekend.

#### Ontwerp (zachte keringen)

Getallen Leidraad zandige Kust zijn gebaseerd op oude KNMI scenario's (HR2001). Deze getallen (o.a. 60 cm) zijn gebruikt voor de zwakke schakels. Tegenwoordig zou men waarschijnlijk net zoals bij het ontwerp van harde keringen de W+ scenario's van het KNMI gebruiken.

#### Planvorming

Fedor vermeldt dat met planvorming vooral ruimtelijke ordening/planning wordt bedoeld. Hierin is het echter lastig concrete indicatoren te vinden; hier en daar wordt nog wel een indicator als 'het stijgt sneller' gebruikt, maar een numerieke waarde wordt nauwelijks gebruikt. (Het idee is dat we hier nog met PBL over spreken.)

Robert: Het KNMI is nooit echt helder geweest over hoe de scenario's zijn afgeleid uit de IPCC-scenario's. Het KNMI werkt nu wel aan een herleidbare methode.

Marcel geeft aan dat de ondoorzichtigheid van de IPCC-scenario's zelf wel meevalt. Voor de eerste 50 jaar zijn fysische (model)onzekerheden dominant. Het is bijvoorbeeld onzeker hoe snel Antarctica smelt. Voor 100 jaar gaat het meer om (menselijke) ontwikkelingen op wereldschaal zoals het effect van de verkiezing van Trump op het klimaat en hoe de overstap op duurzame energiebronnen zich ontwikkelt.

Ruimtelijke ordening is een vreemde eend in de bijt door lange planningsduur en gemiddelde keuze.

### **3. Reacties B&O Kust en 'Toetsing'**

#### Indicator voor gaswinning

Rena stelt dat er wellicht nog een indicator mist, de indicator die gebruikt wordt in het vergunningsbeleid met betrekking tot de gaswinning. Je zou gaswinning als negatieve interventie kunnen beschouwen. De indicator is 'de zeespiegel waar iedereen het mee eens is'. Maar de vraag blijft wat dit dan precies inhoudt? Ernst: Hij lijkt op die van B&O Kust, maar zit er eigenlijk nog een beetje voor. Het meegroeivermogen van de Waddenzee ligt hieraan ten grondslag.

N.B. Dit is een indicator die we inderdaad nog niet hebben uitgewerkt.

#### Regionale verschillen / ruimtelijk beeld

Marcel noemt het afwijken van Harlingen en vraagt zich af of de morfologische ingrepen wel goed verrekend zijn. Zoals het afsluiten van de Zuiderzee.

Het is bij de analyse van (hoog)waterstanden van belang om reeksen te homogeniseren en de referentiejaar te synchroniseren.

Een advies van Marcel en Robert: neem de ruimtelijke samenhang mee in de interpretatie van de statistiek (wat zijn trends en oorzaken?). Voor de gaswinning zou dit bijvoorbeeld goed zijn, omdat het hier om de Waddenzee gaat. De Waddenzee reageert nog steeds op de afsluiting van de Zuiderzee. Fedor zegt dat je dit vooral in de getijamplitudes terugziet, wat aangeeft dat het type indicator ook verschillen kan geven. Toetsing kijkt naar hoogwater, B&O kijkt naar gemiddeld water. Een schipper kijkt naar laagwater. Ernst zegt dat de afsluiting van de Zuiderzee inderdaad vooral effect heeft op de hoogwaters, maar niet op de gemiddelde zeewaterstand.

Rena: In het kennisprogramma Kustgenese-II gaan we kijken naar de accommodatieruimte die gecreëerd wordt door enerzijds zeespiegelstijging en anderzijds bodemdaling. Nu wordt een landelijk gemiddelde van de actuele relatieve zeespiegel gebruikt die wordt bepaald uit de waterstandreeksen. De ambitie binnen Kustgenese is om vlakdekkend naar de kust te kijken. Naar een vlakdekkende schatting van de zeespiegelstijging en de bodemdaling. Idealiter zou het vlakdekkende getal van de zeespiegelstijging de absolute zeespiegelstijging moeten zijn. Dit zou dan vergeleken moeten worden met de huidige methode. Door een vlakdekkende benadering kun je dus de accommodatieruimte/zandvraag bepalen voor specifieke gebieden (bijv. Wadden, Hollandse Kust en de Zeeuwse Delta). Carola geeft aan dat een regionale inschatting van de zandvraag zou helpen bij het verdelen van het zand doormiddel van suppleties.

N.B.1 Marcel. Zowel absolute zeespiegelstijging als de bodemdaling hebben effect op de (feitelijke) waterdiepte, en daarmee in potentie ook op de getijstrooming, getijvorm en getijamplitude.

N.B.2. Marcel. Van belang is ook dat er twee typen bodemdaling zijn: Bodemdaling op regionale schaal, autonoom of door ondergrondingrepen als delfstofwinning. En zeer lokale bodemdaling onder een dijk (feitelijk zetting/compactie van slappe ondergrond).

#### Het belang van een nauwkeurige indicator

Deon en Marcel geven aan dat je moet oppassen met millimeteren, ook op lokale schaal hoeft je niet per vierkante kilometer de bodemdaling te weten. Je moet de nauwkeurigheid in het licht zien van meeton nauwkeurigheden en onzekerheden. Bijvoorbeeld m.b.t. de wind, zoals Marcel en Robert toelichten.

N.B.1 Variabiliteit en onzekerheid windklimaat zijn beide orde 5-10% en geven een soortgelijk effect in golfplooppniveaus (en mogelijk iets meer in stormvloedstanden exclusief golven). Effect kan dus zomaar een meter zijn. En bij voldoende grote onzekerheid kan het gebeuren dat je zelfs bij een gemiddeld licht dalende windtrend als ontwerpwind toch iets hoger moet gaan zitten dan de huidige wind om die onzekerheid veilig te verrekenen.

N.B.2 Weer en wind werken zelfs nog door in jaargemiddelde waterstanden, en dat effect is millimeters tot centimeters. Dat maakt het dan weer lastig om verschillende deelmeetreeksen van de zeewaterstand aan elkaar te knopen voor homogenisering en trendanalyse.

Bij gebrek aan probabilistisch denken wordt gezegd dat de wind niet verandert. Neem je de onzekerheid wel mee, dan krijg je een groot effect op de hydraulische belastingen. (N.B. Buiten Nederland en buiten de waterkeringwereld is probabilistisch denken geen standaard denkwijze. Te vaak wordt alleen gekeken of sprake is van een significante trend, en afgezien van klimaatscenario's vaak niet wordt gekeken naar de impact (op ontwerp) van een onzekerheid in een trend.)

Jean-Marie noemt dat werken in millimeters wel belangrijk is om te ontdekken hoe de zeespiegelstijging verandert. Marcel: gemiddelde zeespiegelstijging is één van de componenten die we goed kunnen meten, maar niet altijd (de) belangrijk(st)e.

Deon noemt dat niet alleen op de Nederlandse stations gelet moet worden. Daar wordt geen versnelde stijging gemeten, waar dit in het buitenland wel zo is. Fedor legt uit dat je in de satellietmetingen een hogere trend ziet dan de trend in de getijstations. De satellietmetingen zijn later begonnen. De onduidelijkheid zit hem dus in het niet aansluiten van de twee bronnen op elkaar. Robert zegt dat het ontzettend moeilijk is om het 0-vlak van de gravitatie te bepalen. De koppeling tussen klimaatmodellen en metingen is lastig, omdat in de klimaatmodellen langdurige effecten zitten die heel moeilijk in de metingen terug te vinden zijn.

Marcel geeft aan dat het interessant zou zijn om onze voorspellingen te controleren met die van onze buurlanden. Puur ter controle van de methode die we gebruiken.

Carola noemt het belang van een nauwkeurige indicator voor de uitvoerbaarheid. Hoe kan ik zodanig suppleties neerleggen dat je voor langere tijd aan de onderhoudsbehoefte kan voldoen (à la de Zandmotor). Hierbij moet je met een lange(re) levensduur ontwerpen, waardoor je de zeespiegelstijging op langere termijn wel degelijk goed wilt weten.

Marcel noemt nog dat de zeespiegelstijging ook relevant is voor specifieke langlopende DBFM-contracten (i.h.b. voor kunstwerken), waarin onderhoud (M van Maintenance) voor enkele decennia is inbegrepen.

#### **4. Reacties ontwerp en planvorming**

##### Het gebruik van verschillende indicatoren

Robert Vos geeft de precieze achtergrond van de 48 cm door: 35 cm tussen 1990 en 2050. + 20 cm voor 2050 – 2070 – 7 cm voor 1990 tot 2015.

Momenteel wordt voor ontwerp van niet-vervangbare onderdelen met het 'scenario Veerman' gerekend. Voor de sluis bij IJmuiden is met dit schijnbaar zeer conservatieve scenario gerekend (zie ook kopje "toekomstige ontwikkelingen"). Marcel vertelt dat voor toekomstige ontwerpen de onzekerheden zo groot zijn dat je niet zonder een kansbenadering kunt (scenario's schieten tekort).

Voor de Meren wordt vanwege de menselijke invloed niet met de standaard Deltascenario's gerekend. Tot 2050 zal het streefpeil niet stijgen, omdat er nog vrij gespuid kan worden. Tot 2080 zal dit niet meer voldoende zijn en zal er extra gepompt moeten worden om de 30 cm stijging (W+) in dit tijdvak tegen te gaan. Op het Markermeer is deze toename zonder pompen de helft van deze 30 cm stijging (dat is, 15 cm). Hiervan wordt 5 cm weggepompt (= besluit DGRW).

Marcel noemt dat er na 2100 niks bekend is over de zeespiegelstijging. Robert vertelt dat bij ontwerpen waarvoor het zichtjaar na 2100 ligt, de trend van 2050 tot 2100 lineair wordt doorgetrokken.

Er is een duidelijk verschil merkbaar tussen indicatoren voor ontwerp en ruimtelijke planvorming. Ontwerp wil een duidelijke waarde hebben (met onzekerheid), planvorming wil liever één of meerdere scenario's hebben. Bij ontwerp is het doel vaak kostenoptimalisatie.

##### De herkomst van scenario's

Voor ontwerp zal waarschijnlijk binnenkort overgestapt worden op de KNMI '14-scenario's. Robert vertelt dat dit momenteel wordt voorbereid: in 2018 gaan we over.

KNMI communiceert naar leken in termen van temperatuurscenario's, maar werkt achter de schermen net als de rest van de wereld met Representative Concentration Pathways (RCP's), ofwel CO2-emissiescenario's. De basis is niet meer de temperatuur, maar de CO2-uitstoot. Dit is prettiger voor het beleid (lees: sluit beter aan op het beleid).

##### Toekomstige ontwikkelingen

DGRW, RWS (Robert Vos), KNMI, Deltares gaan nu de kant op dat niet meer met scenario's gerekend wordt, maar met een kansverdeling over de mogelijk uitkomsten. Omdat de kleine



faalkansen die gebruikt worden bij ontwerpen dan leiden tot een zeer extreme zeespiegelstijging (in de staart van de verdeling), is het effect van de onzekerheid erg groot. Koen Rijnen (afstudeerder van Robert Vos) heeft uitgezocht dat 25 jaar ontwerpen het meest doelmatig is, omdat op deze termijn de onzekerheden nog meevallen.

Deon zegt ook dat het gebruik van scenariokansen de keuze voor vervanging/ontwerp beïnvloedt. In het beslisprobleem wil je onzekerheid meenemen. Dit kan leiden tot flexibelere (adaptieve) maatregelen voor kortere perioden (25 jaar).

#### Het verschil tussen statistische en fysische modellen

Over het gebruik van verschillende modellen voor verschillende termijnen. Het ENW heeft in 2015 geadviseerd om tot 30 jaar uit te gaan van statistische modellen (trends) en vanaf dan met fysische modellen (klimaatscenario's).

Het gebruik van Bayesiaanse statistiek om met metingen de klimaatscenario's bij te stellen zou een geschikte manier zijn om de statistiek bij te stellen.

#### Verskil tussen harde en zachte keringen

Beleid voor zandige kust (Leidraad Zandige Kust) is nog steeds actueel. Dit is ook voor Vlieland en Terschelling toegepast. Voor de harde keringen is met 48 cm gerekend. Voor de zachte keringen is met 30 cm gerekend.

Als je ingreep uitbreidbaar is mag je volgens het OI2014 het G-scenario gebruiken. Zand is uitbreidbaar dus dit zou mogen. Als het G-scenario wordt gebruikt wordt er (zelfs) met een iets lagere waarde dan 30 cm gerekend.

Rena: Voor Hondsbossche Zeewering wijkt het onderhoudsscenario af van het ontwerpscenario. Voor adaptief ontwerp is dus geen eenduidige richtlijn. Rena geeft aan dat er voor adaptieve strategieën dus wat bedacht moet worden.

## **5. Synthese**

Fedor vat samen:

We zien dat de zichtjaren en referentiejaren variëren, dat er verschillende scenario's gebruikt worden, en dat ontwerp en beheer naar elkaar toegroeien. Hierdoor wordt een eenduidige indicator belangrijker. Of in ieder geval richtlijnen voor welke indicator wanneer te gebruiken. Zeespiegelstijging telt niet altijd evenveel mee, soms is het belangrijk, terwijl er ook gevallen zijn waarin de zeespiegelstijging geen significant effect heeft op een beslissing.

Wellicht is het goed om nog specifiek met iemand van PBL of DGRW overleggen over de indicatoren die voor planvorming gebruikt worden. Wellicht kan als indicator uitgewerkt worden: "welk deel van Nederland ligt onder zeeniveau". Dit zegt iets over het overstromingsgevaar.

N.B. Marcel vindt dit niet zo'n gewone/veelzeggende indicator. Wel de zeespiegelstijging in centimeters per eeuw. Een interessante maar lastiger te bepalen indicator is de jaarlijkse (gemonetariseerde) risicotename t.g.v. zeespiegelrijzing: hoeveel zou het actuele overstromingsrisico over heel NL toenemen als die zeespiegelrijzing vandaag ingaat?

Over de ruimtelijke schaal: ontwerpindicatoren zijn uitgesplitst naar regionaal gebied, het gaat uiteindelijk om de relatieve stijging bij bijvoorbeeld een dijk. Toetsen: hoogwater varieert ook regionaal. B&O: wordt ook toegewerkt naar regionale schaal, waar is onderhoud het meest nodig.

Carola vraagt: stel we voeren systeemsuppleties uit met een ontwerplevensduur van 20 jaar (tussen korte en lange termijn in). Hoe kunnen we dan met versnelde zeespiegel rekening houden? Is hier een indicator voor beschikbaar?

Robert stelt dat je bij ontwerpen met een kortere levensduur een LCC-analyse moet uitvoeren.

Robert merkt tot slot op dat de hockeystickvorm van de klimaatscenario's genoemd kan worden. Hoe is de sterk toenemende stijging te verklaren?

## **Toevoeging HKV - vervolgstappen**

Wat betekent dit voor de rapportage? De volgende indicatoren zijn in het concept rapport uitgewerkt. (Tussen haakjes staan de aanvullingen op basis van de expertsessie.)

B&O Kust: actuele trend in de relatieve zeespiegelstijging (wens: uitsplitsing naar regio's)  
Beoordeling: toeslag getijhoogwaterstijging (hier ook naar regionale behoefte kijken)  
Ontwerp: scenario's absolute zeespiegelstijging voor harde en zachte waterkeringen (behoefte: regionale absolute zeespiegelstijging en bodemdaling, kansverdeling over scenario's)  
Planvorming: scenario's absolute zeespiegelstijging (+ percentage oppervlak Nederland onder NAP, nog in overleg met PBL/DGRW)

Aanvullende uit te werken indicatoren kunnen zijn:

1. Bodemdaling (suggestie Rena). Wordt in Kustgenese-II uitgewerkt.
2. Indicator voor zeespiegelstijging die in vergunningsbeleid voor gas- en zoutwinning Waddenzee en de Noordzee wordt gebruikt.
3. Percentage oppervlak Nederland onder zeeniveau (planvorming/ruimtelijke ordening)
4. Indicator voor Lange termijn Waterhuishouding: inrichting IJsselmeer, zeespiegelstijging voor 2150-2175 (dit meenemen in ontwerp/planvorming; we ontwerpen nu objecten met levensduur van maximaal 100 jaar, rekening houdend met bouw is zeespiegelstijging tot 110 jaar vooruit interessant).

Binnen het project werken we 6 indicatoren uit. We stellen daarom voor om naast de al uitgewerkte indicatoren ook de indicatoren 2 en 3 verder uit te werken. Indicator 4 komt aan bod bij ontwerp/planvorming.

In het rapport zullen duidelijke concrete aanbevelingen staan voor vervolgacties die nodig zijn om tot eenduidige indicatoren te komen.

## **Referenties**

Baart et al. (2015)

Zeespiegelmonitor 2014. Fedor Baart, Robert Leander, John de Ronde, Hylke de Vries, Vincent Vuik en Robin Nicolai. Deltares rapport 1209426.202. Deltares, HKV en KNMI, 2015.



HKV lijn in water BV

Postbus 2120  
8203 AC Lelystad

Botter 11-29  
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42  
[info@hkv.nl](mailto:info@hkv.nl)  
[www.hkv.nl](http://www.hkv.nl)

## **10.6 Invoering nulpalen**

*H. Bouwrik*

RIJKSWATERSTAAT  
DIRECTIE ALGEMENE DIENST  
EN WATERHUISHOUDING

-----  
Hydrometrische Afdeling  
-----

Invoering van NULPALEN.

Geleidelijk worden ter plaatse van peilmeetstations aangebracht diep gefundeerde betonpalen of andere constructies. Het nulpunt van de betreffende peilschaal of peilschrijver wordt onwrikbaar en onverstelbaar aan deze vaste palen verankerd. Het is de bedoeling, dat tot in lengte van tijd de vaste peilschalen of peilschrijvers gelijk gehouden zullen worden aan de aldus vastgelegde nulpunten. Ten behoeve van dit gelijk houden worden voor elke opstelling speciale maatregelen genomen, afgestemd op de situatie.

De vaste opstelling als zodanig wordt, ongeacht of deze bestaat uit een betonpaal, een buisconstructie, een kunstwerk op staal of op palen of welke andere constructie ook, aangeduid als

NULPAAL

Andere, tot nu toe wel gebruikte aanduidingen (als Merkpaal e.d.) dienen verder te worden vermeden. Er zullen dus voor peilschalen twee methodes zijn om het nulpunt vast te leggen en gelijk te stellen n.l.

- 1e. De halfjaarlijkse B en de 2-jaarlijkse A verificaties, waarbij de N.A.P.-hoogten worden ontleend aan de verkenmerken, die daarvoor zijn aangewezen.
- 2e. Vastlegging aan de nulpaal ter plaatse. Na eenmalige vaststelling van de N.A.P.-hoogten aan de nulpaal blijft deze hoogte voorgoed ongewijzigd. De nulpaal wordt geacht de plaatselijke N.A.P.-hoogten onveranderlijk over onbepaald lange termijn te handhaven.

's-Gravenhage, 15 december 1958.  
Het Hoofd van de Hydrometrische  
Afdeling  
De Hoofdingenieur "A",

*P. J. Wemelsfelder*

(ir. P.J. Wemelsfelder).

*circularen en parasferen*

*AB*

*35*  
*24/12-58*

*200*

*P.B.*  
*M.*

*M.R.*

*AB*

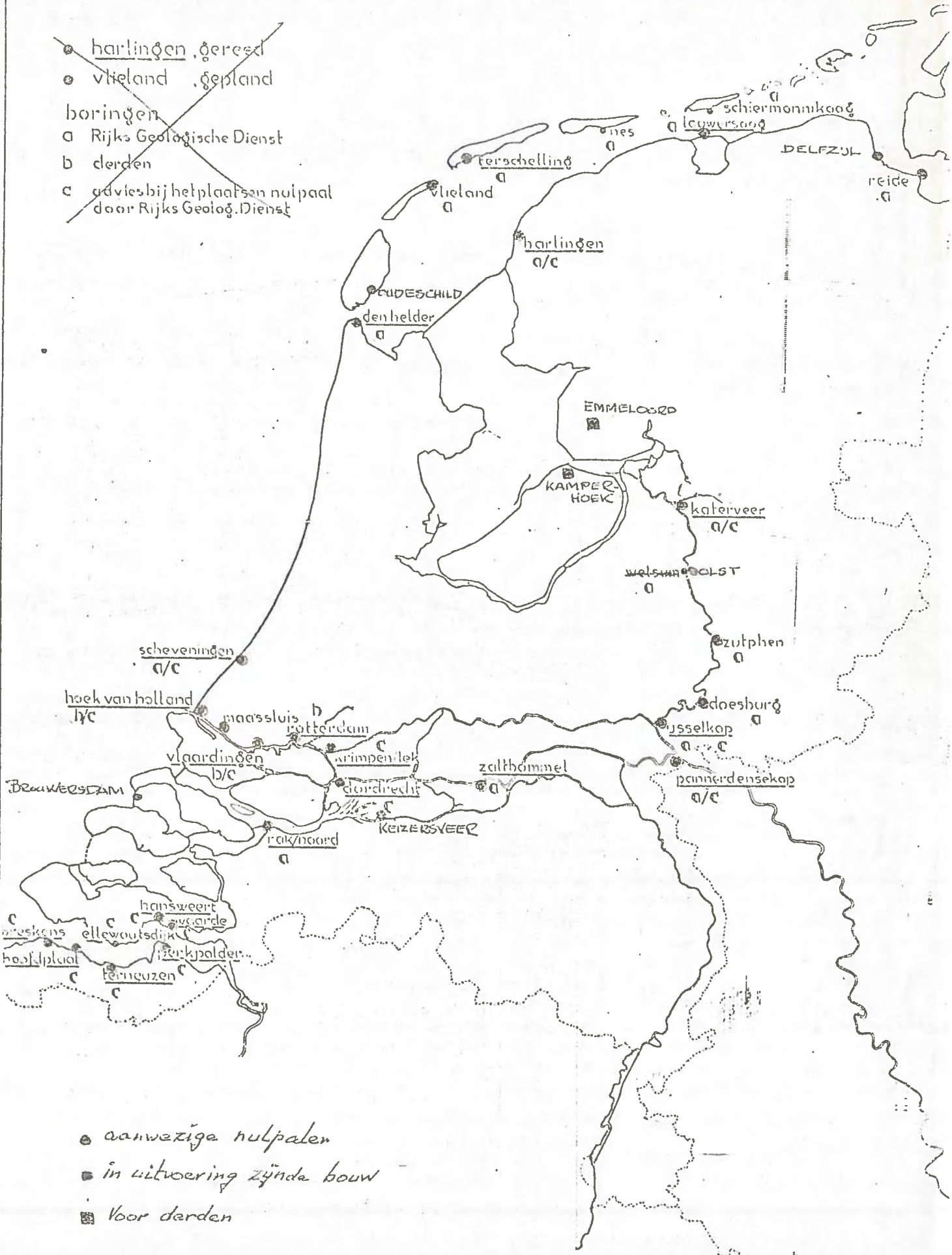
*2*  
*#*

nov. 76.

fig.

# overzicht nulpalen

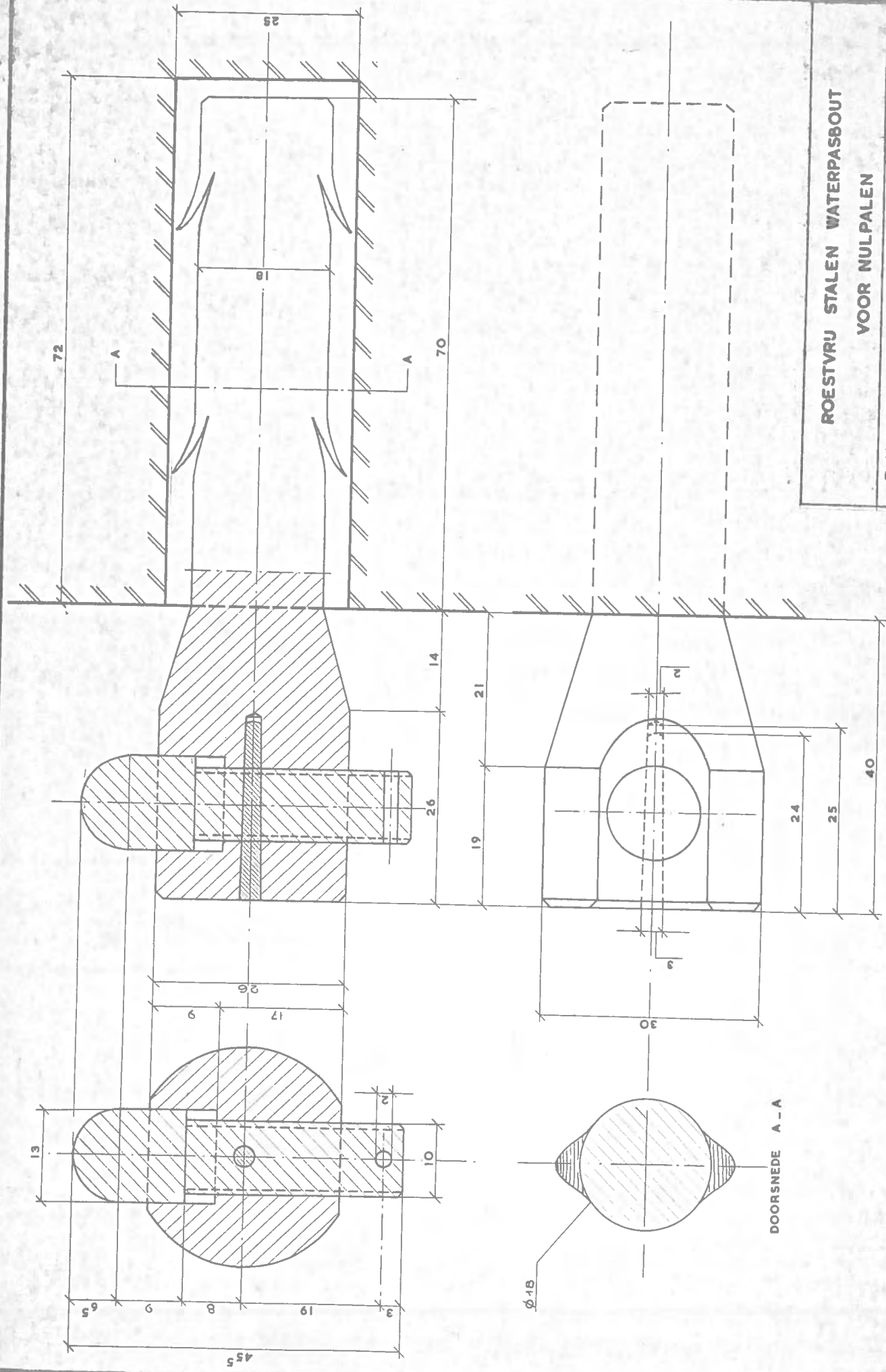
- ~~• harlingen, oeresd~~
- ~~• vlieland, gepland~~
- ~~boringen~~
  - ~~a Rijks Geologische Dienst~~
  - ~~b derden~~
  - ~~c advies bij het plaatsen nulpaal door Rijks Geolog. Dienst~~



- aanwezige nulpalen
- in uitvoering zijnde bouw
- voor derden

*M.* 3-11-76 A1.72.61





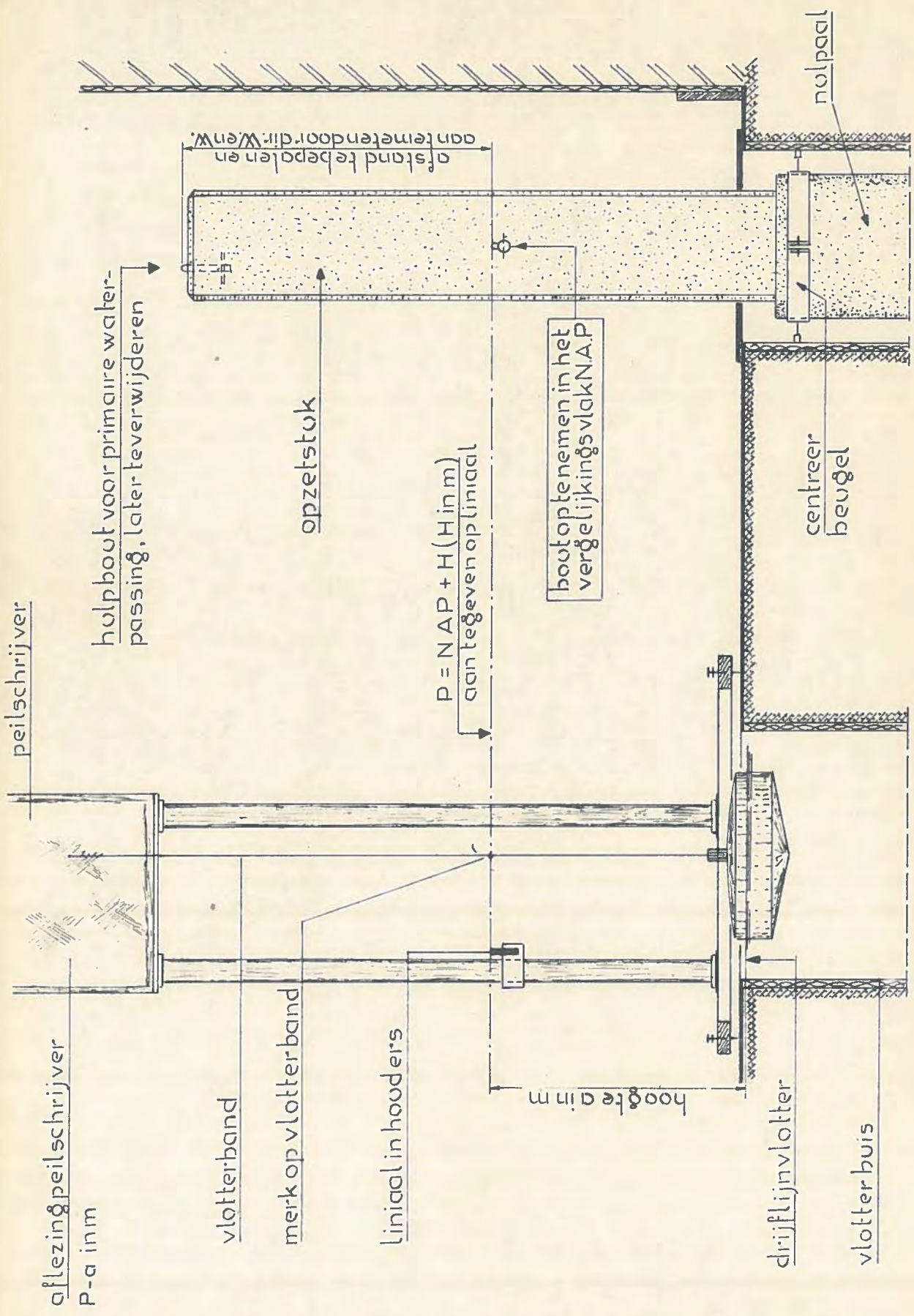
ROESTVRIJ STAAL WATERPASBOUT  
VOOR NULPALEN

RUKSWATERSTAAT  
DIR. WATERHOUHOUDING EN WATERBEWEGING  
Hydrometrische afdeling  
SCHEFFERSDE 25 DEN HAAG TEL. 070-433980

SCHAAL 2:1

VERBODEN TOEGANG	GETEKENED	DATUM	BLAD	TOTAAL
	<i>M</i>	26-10-52	2	63.178





handhaving nulpunt A169.100

stations, goed gefundeerd, geen nulpaal, toestel met r.v.s.vlotterband, verificatie volgens de inhang methode

fig.

station	waterpasboot		eventuele hulpbout		liniaal hoogte	meet bereik instrument
	plaats	hoogte	plaats	hoogte		
bath *			b.k. meetpaal	+8.60		+4.900/6.900
cadzand *			b.k. vlotterbuis	+8.71		+4.900/6.900
kats	in getijschr. ruimte links van de inhang		boutje b.k. vlotterbuis			+5.400
rak/zuid	in getijschr. huisje in muur tegenover de inhang				+6.000	+5.400
krammer	in getijschr. ruimte in muur rechts v/d inhang		boutje b.k. vlotterbuis	+5.04 '71		+5.400
orevelingen *	in peil meetruimte in muur tegenover de inhang		boutje b.k. vlotterbuis	+5.14 '71		+5.400
brouwershaven	in peilschr. huisje in muur links bezijden peilschr.					+5.400
ouddorp						+5.400
hellevoetslois						+5.900
katwijk *			b.k. vlotterbuis	+10.70		+5.400
aostoever						+5.900
heel/bov. *	Rb/011 in 14e meerstoel in boventoeleiding kan.	+23.557 '71	boutje insparing vlotterbuis	+23.125 '71		+25.400
heel/ben. *	Rb/010 in 9e meerstoel in beneden toeleiding kan.	+20.760 '71	boutje b.k. vlotterbuis	+20.514 '71		+19.400/21.400
lith						+6.900/8.900
hedel						+6.900
heesbeen						+6.400
mond der donge						+6.400
maerdijk	buiten getijschr. huisje in muur links v/d inhang					+6.400
geertruidenberg *						+6.400
lobith	in peilschr. huisje in muur tegenover de inhang				+18.500	+14.400/18.400
herwijnen						+7.900
gorinchem						+6.900
werkendam/buit	in getijschr. huisje in muur links v/d getijschr.					+6.900
kop van het land	in getijschr. huisje in muur tegenover de inhang					+6.900
spijkenisse					+5.000	+6.400
sgravendeel	in getijschr. huisje in muur tegenover de inhang					+6.400
willemsdorp	in getijschr. huisje in muur tegenover de inhang					+6.400
driel/bov. *	buiten het peilschr. huisje links van de inhang				+13.900	+12.400/14.400
driel/ben.	in het betonvlak achter de spiltrap		buiten, rechts van de inhang v/d meetruimte		+13.900	+12.400/14.400
amerongen/bov. *					+10.500	+9.400/11.400
amerongen/ben.					+10.500	+9.400/11.400
haagstein/bov. *					+7.800	+6.900/8.900
haagstein/ben.					+7.800	+6.900/8.900
krimpen/ijsel						+5.900
streefkerk	in putje in talud voor getijschr. huisje	+2.3460 hw.p.'67				+6.400
vliissingen	in zijvlak op zetstuk in getijschr. huisje		hulpboutje in kop van het opzetstuk	+7.240 '69	+6.700	+4.900/6.900
bruinisse	in muur rechts v/d inhang in getijschr. huisje					+4.900
zierikzee	buiten getij meetruimte in muur rechts v/d inhang					+5.400

\* sels in overbrenging

A 1.72.29

## **10.7 Nulpalen en bodemdaling**

Bodemdalings, veroorzaakt door aardgaswinnings  
In de provincie Groningen.

- 1°. Door aardgasonttrekkingen aan diep gelegen zandsteenlagen in de provincie Groningen, zullen op langere termijn aldaar bodemdalingen gaan optreden, waarvan de vermoedelijke omvang en de grootte kunnen worden ontleend aan een daarover door de NAM gepubliceerde nota. De nota verwacht voor het jaar 2050 dalingen aan van ca. 1 m in het centrum van het gasveld, aflopend tot geringe waarde aan de provinciegrenzen. De verwachte dalingen hebben ingrijpende consequenties voor de waterstaatkundige toestand van de provincie o.a. wat betreft de bescherming tegen stormvloed en de ontwatering.
- 2°. Ook voor het peilschaalwezen hebben de bodemdalingen gevolgen. Tot op heden vinden de waarnemingen plaats aan schalen en peilschrijvers, waarvan de nulpunten op NAP worden gesteld aan de hand van hoogtegegevens van peilmerken, rondom de meetpunten gelegen. Nu deze ook aan een zakking zijn onderworpen, moet ten aanzien van de waterstandswaarnemingen een toekomstig beleid worden uitgestippeld.
- 3°. De dalingen van de peilmerken in de provincie Groningen zullen worden gemeten door periodieke waterpassingen vanuit ondergrondse peilmerken in aangrenzende gebieden, waarvoor geen zakking wordt verwacht. De frequentie van deze waterpassingen is gesteld op eens per drie jaar. Uitgezet in grafiekvorm zal in het jaar 2050 een redelijk nauwkeurig overzicht worden verkregen over de zakking als tijdsfunctie voor diverse punten in het zakkingsgebied.
- 4°. Tussen twee waterpassingen in is echter de hoogteligging der peilmerken nabij de peilmeetinrichtingen onvoldoende bekend en alleen te benaderen door een extrapolatie in tijd over een half tot drie en een half jaar. Hierbij is aangenomen, dat er tussen het tijdvak van waterpassen en het tijdstip van bekend worden der hoogtecijfers ca.  $\frac{1}{2}$  jaar verloopt. Zou men de peilmeetinrichtingen gelijkstellen aan de aan de waterpassingen ontleende hoogten, dan loopt men met die gelijkstellingen gemiddeld twee jaar achter. Speciaal bij vaste schalen zullen deze verstellingen moeilijk uit te voeren zijn. Als voornaamste bezwaar van deze werkwijze dient echter te worden vermeld, dat in de waarnemingsseries discontinuïteiten optreden. Deze degraderen de waarde der waarnemingen.
- 5°. Leidt men de nulpunten der peilmeetinrichtingen af uit de hoogten der plaatselijke peilmerken, zoals deze voor de bodemdaling zijn toegekend, dan vermijdt men discontinuïteiten. Doordat dan de nulpunten der peilmeetinrichtingen met de bodem dalen, zal men constateren, dat de waterstanden in de zakkingsperiode schijnbaar voortdurend blijven stijgen. De omrekening van de waarnemingen ten opzichte van het NAP-vlak kan echter binnen 4 jaar na waarneming plaatsvinden met een nauwkeurigheid beter dan één hoogte en vrijwel continu. De zo gecorrigeerde waarnemingen zullen voor alle verdere bewerkingen (frequenties van hoog- en laagwaterstanden, gemiddelde zeestand) zonder moeilijkheden met vroegere waarnemingen kunnen worden vergeleken en gebruikt.
- 6°. Komt aldus de genoemde werkwijze in alle opzichten tegemoet aan de verwerkingseisen en het wetenschappelijk gebruik der meetgegevens, de plaatselijke gebruiker van waterstanden zal met de gevolgde methode moeite hebben, door de voortdurende stijging van de standen ten opzichte van de opgaven in de getijtafel.

Zou bij niet verstelde nulpunten de getijtafel van Delfzijl aan de bodemdaling moeten worden aangepast, dan is er bij de berekening reeds een achterstand van een half tot drie en een half jaar ten opzichte van de bodemdalingswaarnemingen. Dit betekent bij een tijdverloop van een tot twee jaar tussen berekening en gebruik der getijtafel, dat over  $1\frac{1}{2}$  tot  $5\frac{1}{2}$  jaar de bodemdaling moet worden geextrapoleerd. Het is daarom beter niet de getijtafel aan te passen, doch correcties op te geven.

- 7°. Daarom zal de getijtafel voor Delfzijl worden gepubliceerd volgens de oude grondslagen, ten opzichte van het ware NAP-vlak. Aan de opgaven wordt de volgende mededeling toegevoegd (een fictief voorbeeld) :

Terwille van de continuïteit der waarnemingen worden in Groningen de peilschalen en peilschrijvers sinds 1972 niet meer versteld. Door de bodemdalingen ten gevolge van aardgasonttrekkingen in deze provincie moeten daarom aan de hoog- en laagwaterverwachtingen voor de stations in dit gebied in het jaar 1976 de volgende correcties worden toegepast :

	Uit waterpassing 1973		Uit verwachte bodemdaling 1973-1976		Verwachte correctie 1976
Nieuwe Statenzijl	0 cm	+	0 cm	=	0 cm
Fiemel/Reidersluis	+ 1 cm	+	1 cm	= +	2 cm
Termunterzijl	+ 2 cm	+	2 cm	= +	4 cm
Oterdum	+ 5 cm	+	3 cm	= +	8 cm
Delfzijl	+ 8 cm	+	7 cm	= +	15 cm
Eemshaven	+ 5 cm	+	4 cm	= +	9 cm
Noordpolderzijl	+ 3 cm	+	2 cm	= +	5 cm
Lauwersoog	0 cm	+	0 cm	=	0 cm

De correcties bevatten dus een „hard“ cijfer, afgeleid uit de meest recente waterpassing en een extrapolatie op grond van een verwachting. Nieuwe correctiecijfers kunnen zonodig na elke nauwkeurigheidswaterpassing op een los vel aan de belanghebbenden langs Dollart, Eems en Oostelijke Waddenzee worden medegedeeld. Bijkomstig voordeel is, dat de correcties een duidelijk inzicht geven in de reeds opgetreden bodemdaling en dijkskruindaling en zodoende een indruk geven van de veiligheid, die de dijken nog tegen overstroming bieden.

- 8°. Verwachtingen voor de hoog- en laagwaterstanden voor alle stations langs de Groningse kust kunnen nu uit de verwachtingen voor Delfzijl door toepassing van een enkel en uit de laatste nauwkeurigheidswaterpassingen afgeleid correctiecijfer worden afgeleid. De van ouds her bekende betrekkinglijnen voor dit gebied blijven daarbij van kracht.

ir. H. de Jong  
17 februari 1973.