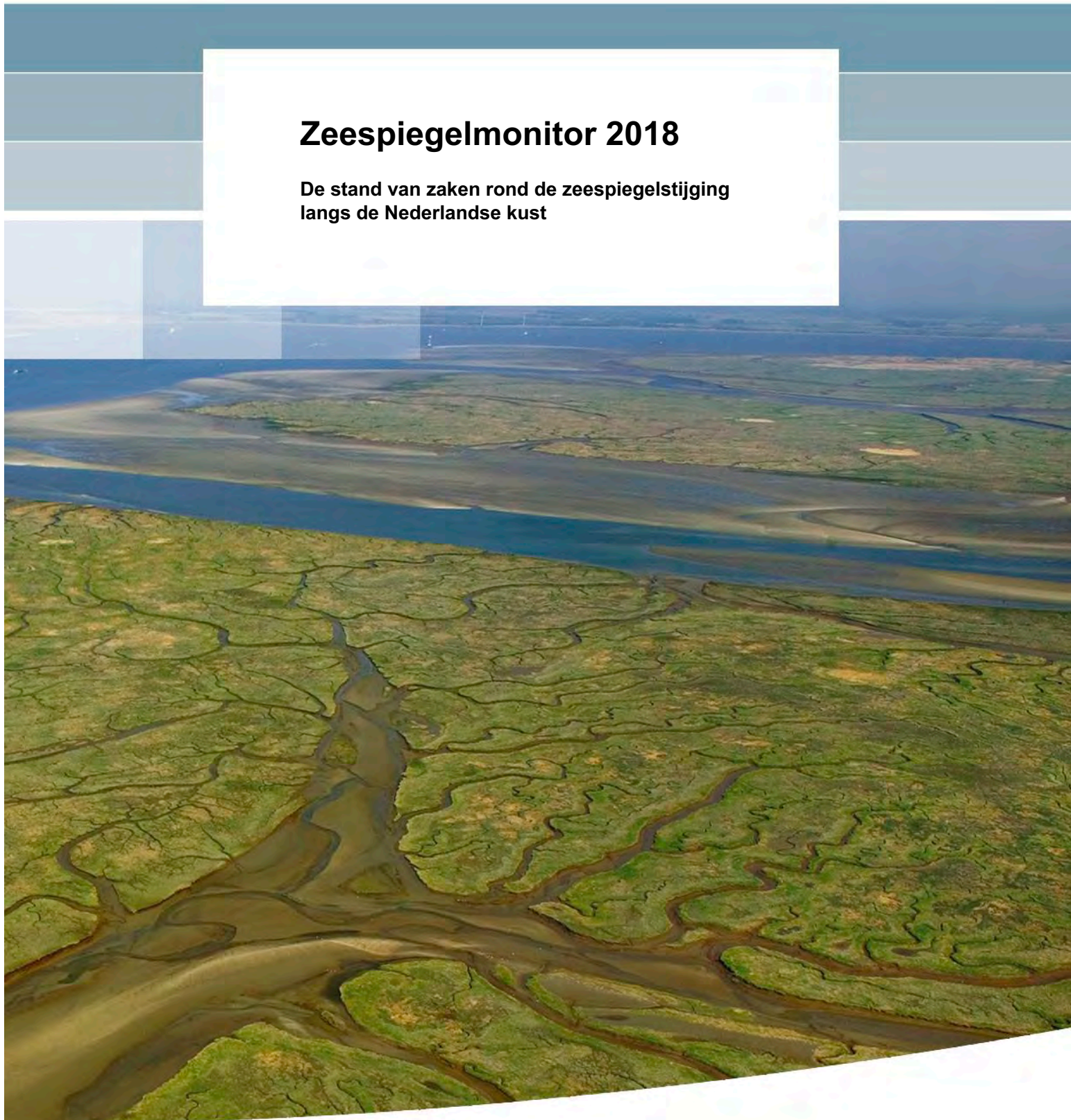


Zeespiegelmonitor 2018

**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

1	Inleiding	11
1.1	Aansluiting bij eerder onderzoek	12
1.2	Onderzoeksvragen	13
1.3	Leeswijzer	14
1.4	Review	14
2	Oorzaken relatieve zeespiegelstijging	15
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
3	Toepassingen	31
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
4	Metingen	39
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
5	Methoden voor de bepaling van de huidige zeespiegel	47
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
6	Resultaten: de huidige zeespiegel	53
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
7	Discussie	67
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
8	Conclusie	73
8.1	Antwoorden	73
8.2	Aanbevelingen	73
8.3	Vervolgonderzoek	74
9	Referenties	77
10	Bijlagen	93
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 m³ gesuppleerd (De Ronde, 2008). Er wordt naar gestreefd het gehele kustfundament, inclusief de landzijde mee te laten groeien (Verkeer en Waterstaat, 2008).

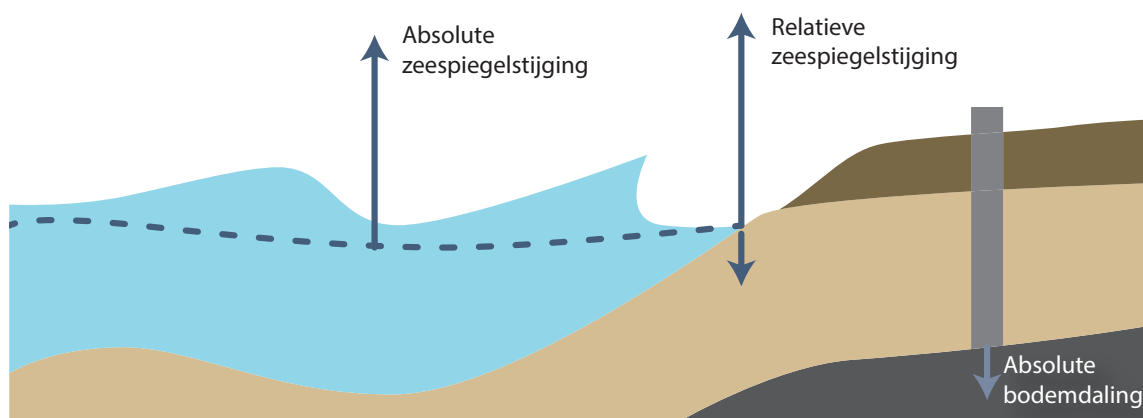
In de laatste jaren is de hoeveelheid tijdelijk teruggebracht. Er is meer zand blijven liggen dan verwacht na de aanleg van de kustversterkingen. Daardoor is er voor het handhaven van de Basis KustLijn (BKL), tijdelijk minder zand nodig. De BKL is de kustlijn zoals die op 1 januari 1990 lag en is sindsdien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

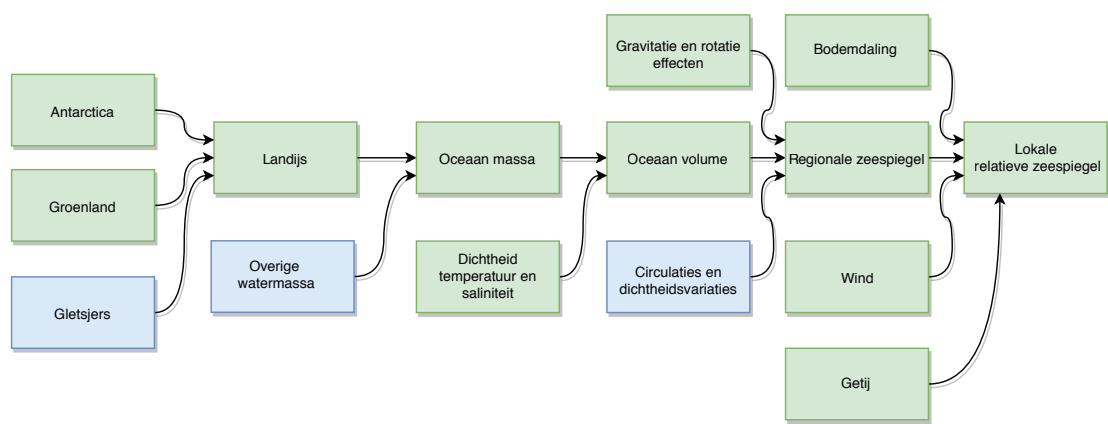
Merk op dat de paginanummers van bovenstaande vragen in de digitale versie van dit document voorzien zijn van een hyperlink. Hiermee kunt u klikken naar de juiste pagina. Dit geldt ook voor verwijzingen naar acroniemen waarmee u bij het overzicht van afkortingen kunt komen, te vinden in hoofdstuk 9. 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.

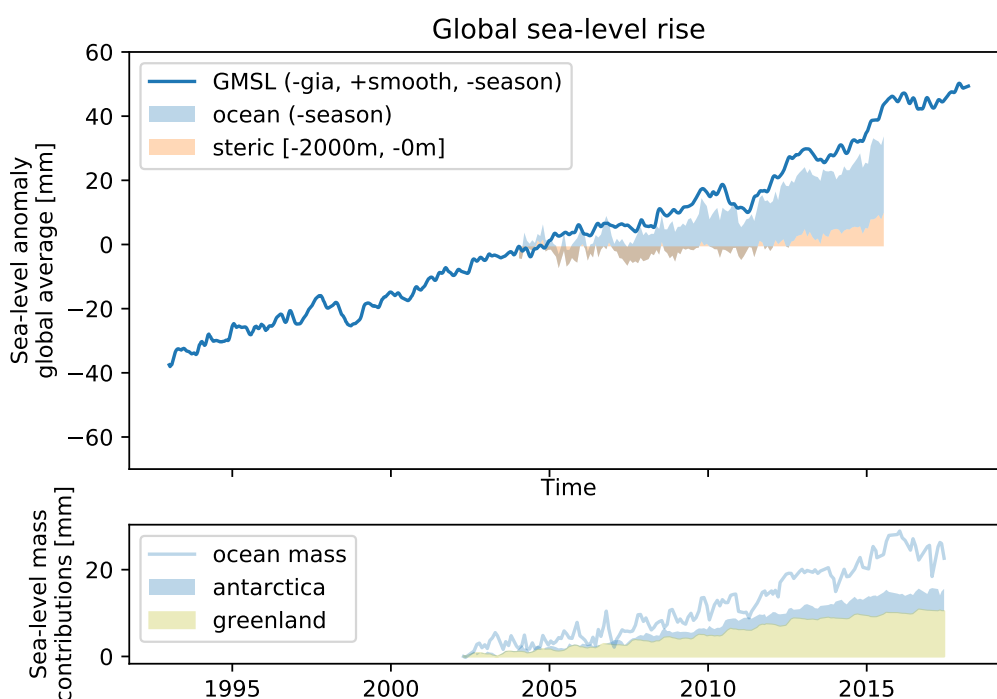
Een overzicht van de uitsplitsing van de globale zeespiegelstijging, over de periode 1990-2017 is te vinden in fig. 2.2 [\[2\]](#). Deze uitsplitsing wordt gebruikt om te kijken of de verschillende metingen met elkaar in overeenstemming zijn. In dit geval zijn de zeespiegelmetingen op basis van de verschillende 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).

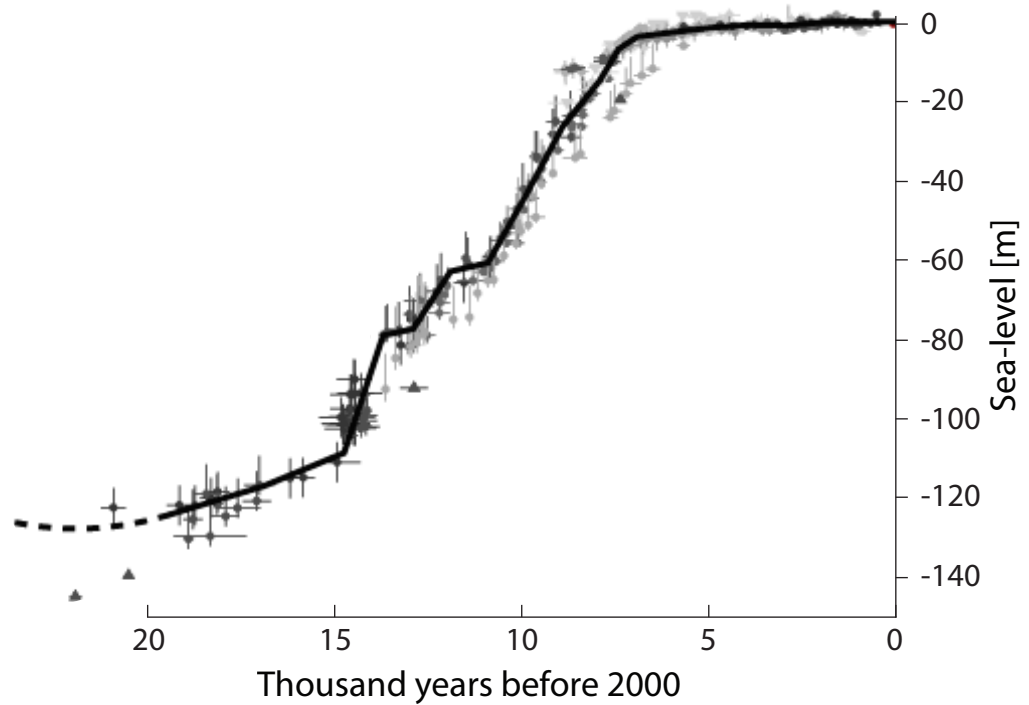
Het is duidelijk dat de zeespiegel in de 20e eeuw sneller steeg dan enkele honderden jaren terug, tijdens de zogenaamde 'kleine ijstijd' (zie bijvoorbeeld Buisman and Engelen, 2006) die duurde van de 15e tot en met de 19e eeuw. Over het antwoord op de vraag wanneer de zeespiegel precies is gaan versnellen (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

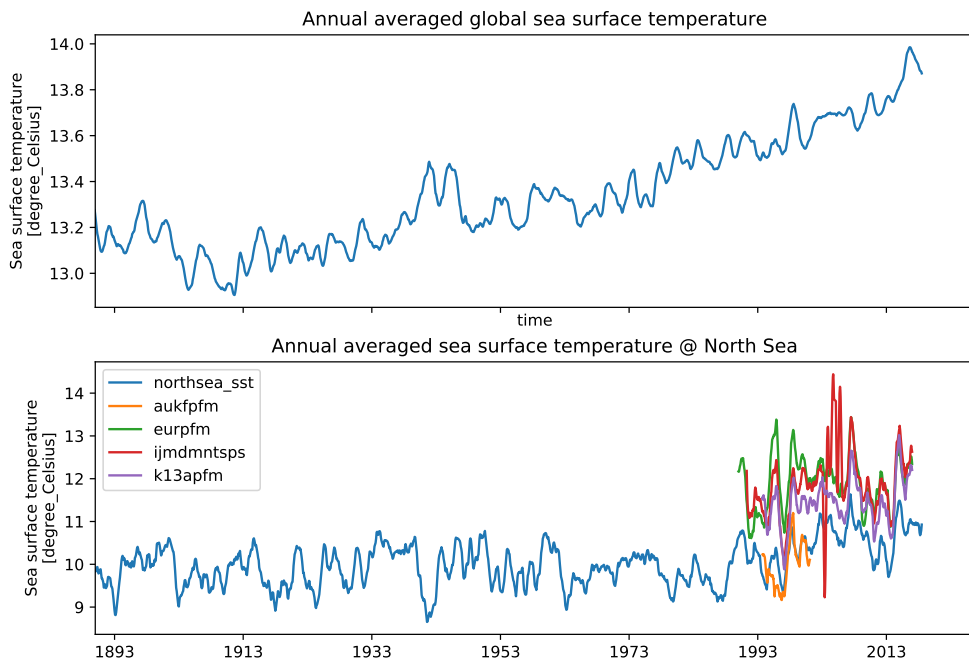
Een belangrijke factor in de trend van de zeespiegel is de temperatuur van de oceanen. Als de temperatuur stijgt, stijgt de zeespiegel doordat warmer water een lagere dichtheid heeft. Zoet water heeft de hoogste dichtheid bij 4°C, hoe zouter het water hoe lager de temperatuur met de hoogste dichtheid (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, 27Mkm³ of een equivalent van 58m zeespiegelstijging ([Fretwell et al., 2013](#)).

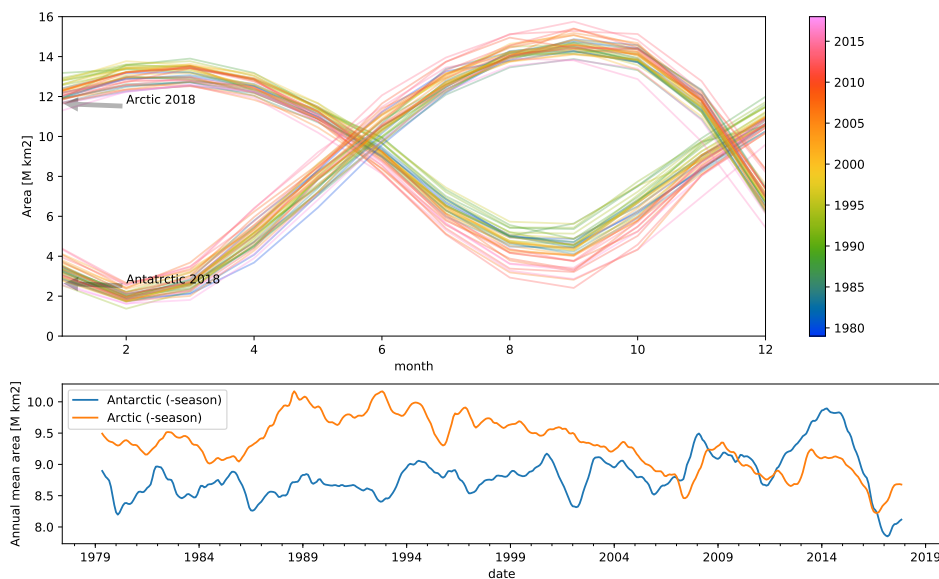
Een overzicht van verschillende studies naar smelten van gletsjers is te vinden in bijvoorbeeld [Gardner et al. \(2013\)](#). Daaruit blijkt dat veruit het grootste deel van de huidige gletsjers nog steeds massa verliest. Eerdere studies wezen op een sterk versneld massa verlies van gletsjers, maar op 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.

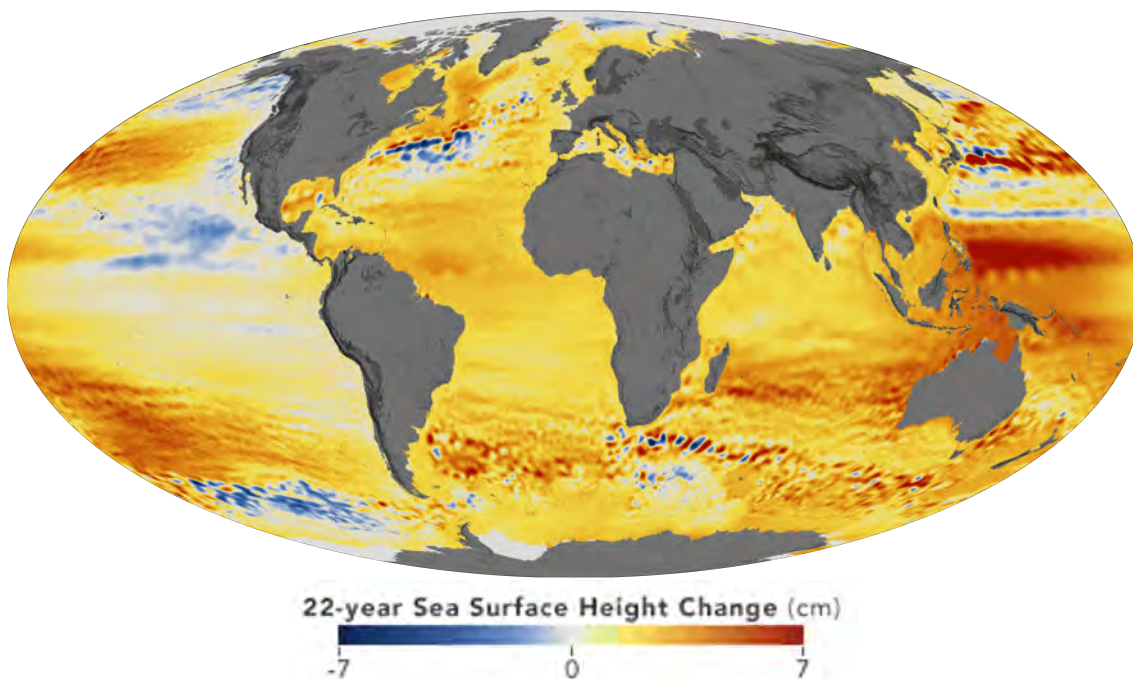
De trends van het zeeijsoppervlak zijn weergegeven in fig. 2.5, op basis van [Fetterer et al. \(2017\)](#). Het oppervlak van het zeeijs van de Noordpool is sinds 1989 aan het dalen. Het oppervlak van het zeeijs van de Zuidpool steeg gestaag tot 2015, toen is het oppervlak abrupt gekrompen.



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.



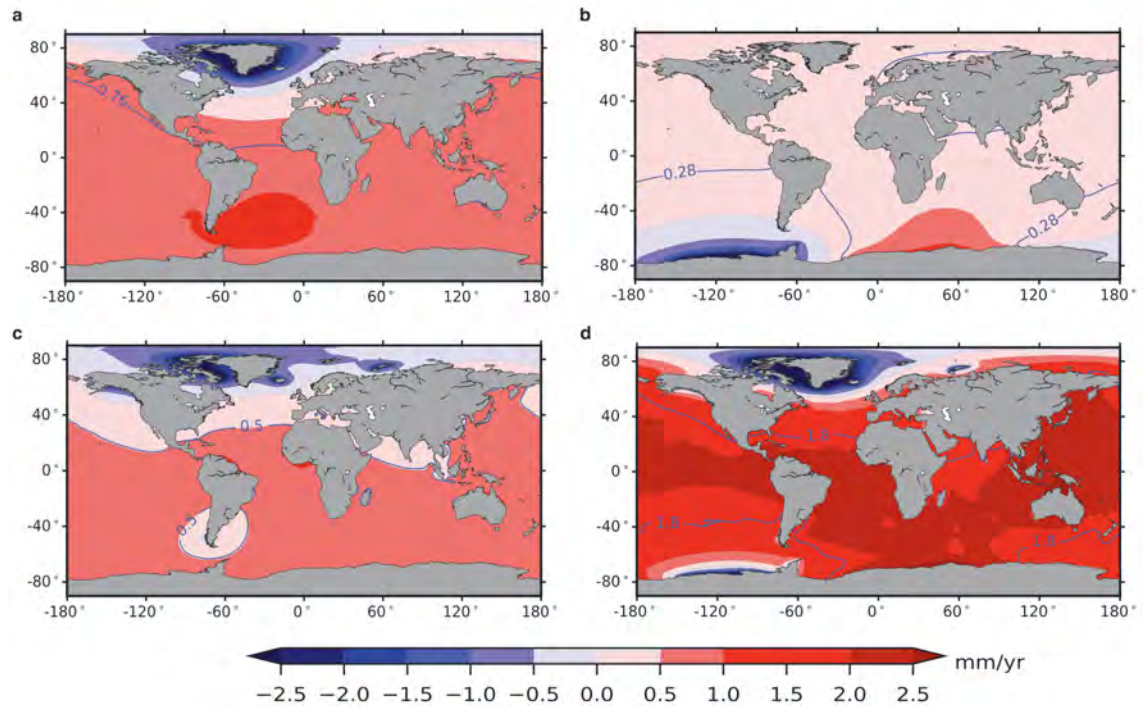
Figuur 2.6: Overzicht van zeespiegel trends op basis van satellietmetingen (1993-2014) ([Zlotnicki et al., 2016](#)).

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



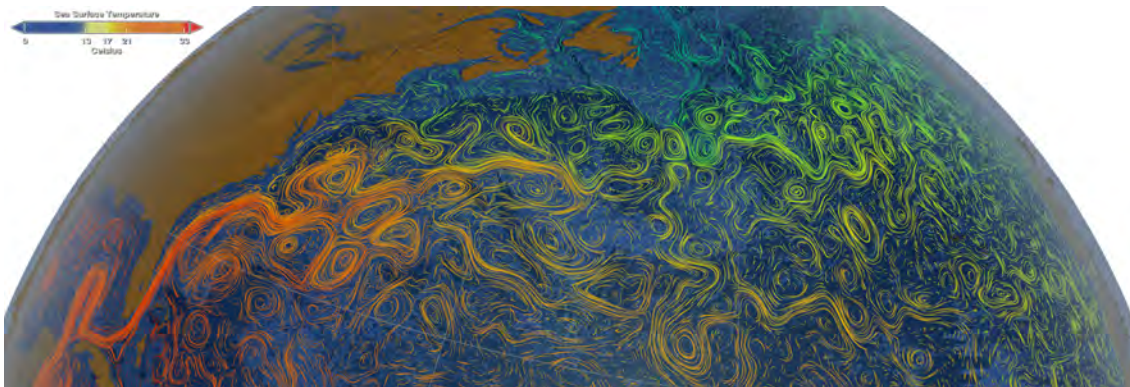
Figuur 2.7: Trends (over de periode april 2002 tot oktober 2014), berekend vanuit Sea Level Fingerprint (SLF) uit (a) Groenland, (b) Antarctica, (c) ijskappen en gletsjers en (d) de som van a–c (inclusief correcties). De blauwe lijn geeft aan waar de stijging evenredig is met de smelting, licht rode 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

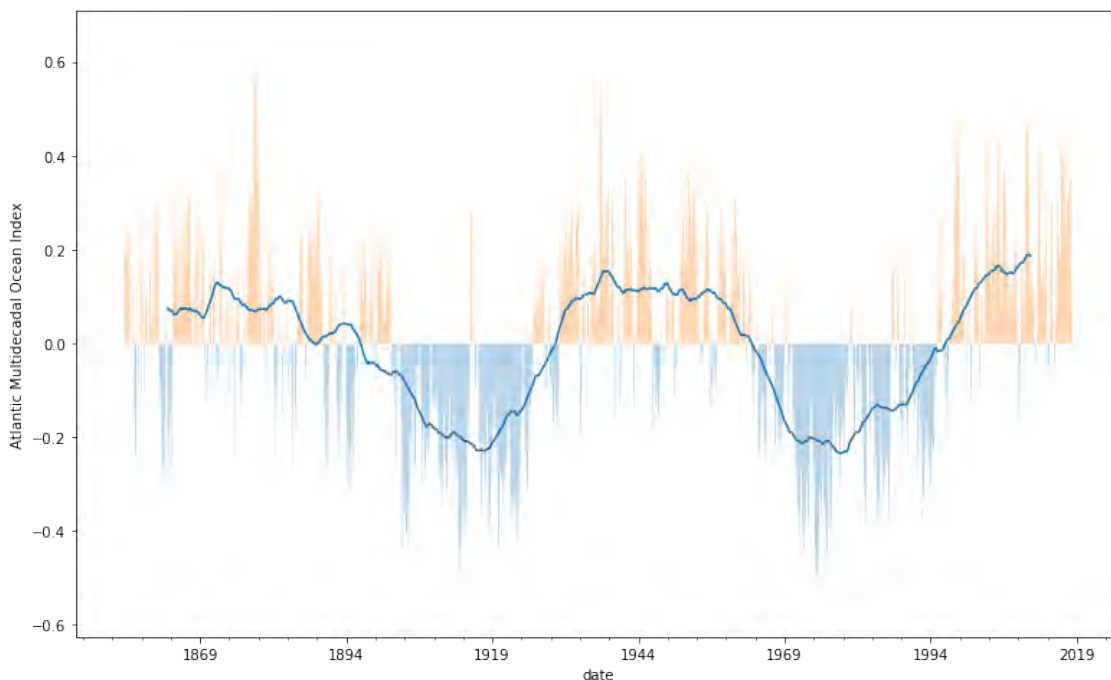
De zeespiegel kan ook beïnvloed worden door oceaancirculaties. Door verschillen in temperatuur, saliniteit, het corioliseffect en de kracht van de wind op het oppervlak van de oceaan ontstaan er oceaancirculaties, weergegeven in fig. 2.8.

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

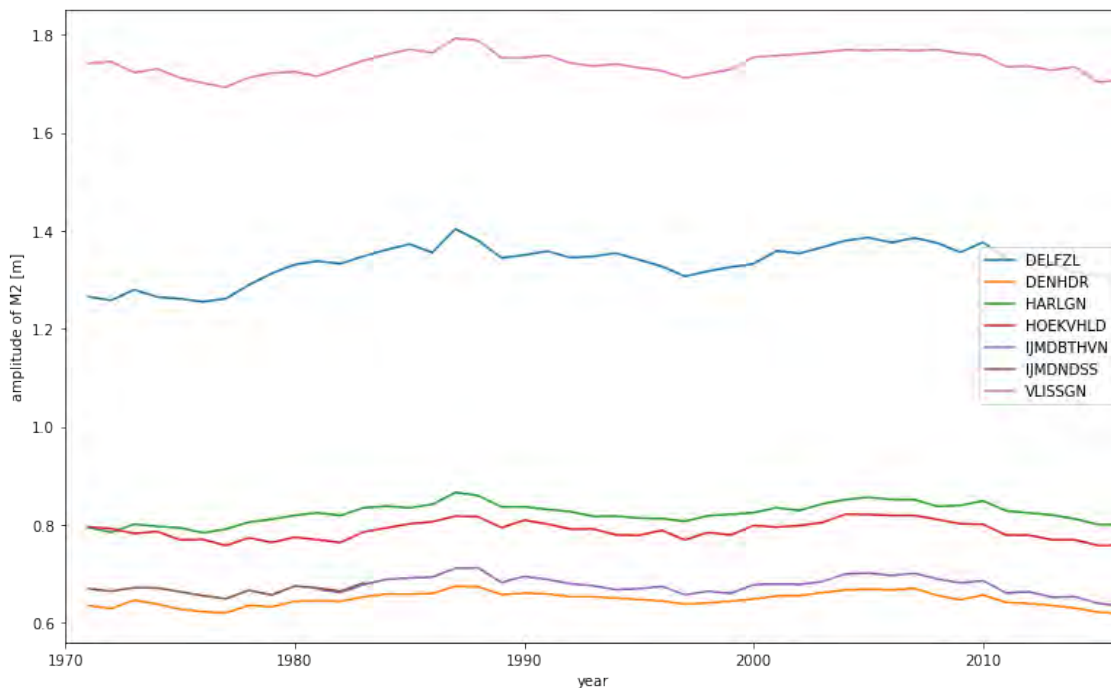
Het zeeoppervlak varieert door veranderingen van de aantrekkingskracht veroorzaakt door verandering van de posities van de aarde, de maan en de zon. Dit resulteert in zes verschillende frequenties tabel 2.1 die samengesteld tot een variabele waterstand leiden, het getij. Deze frequenties beïnvloeden 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).

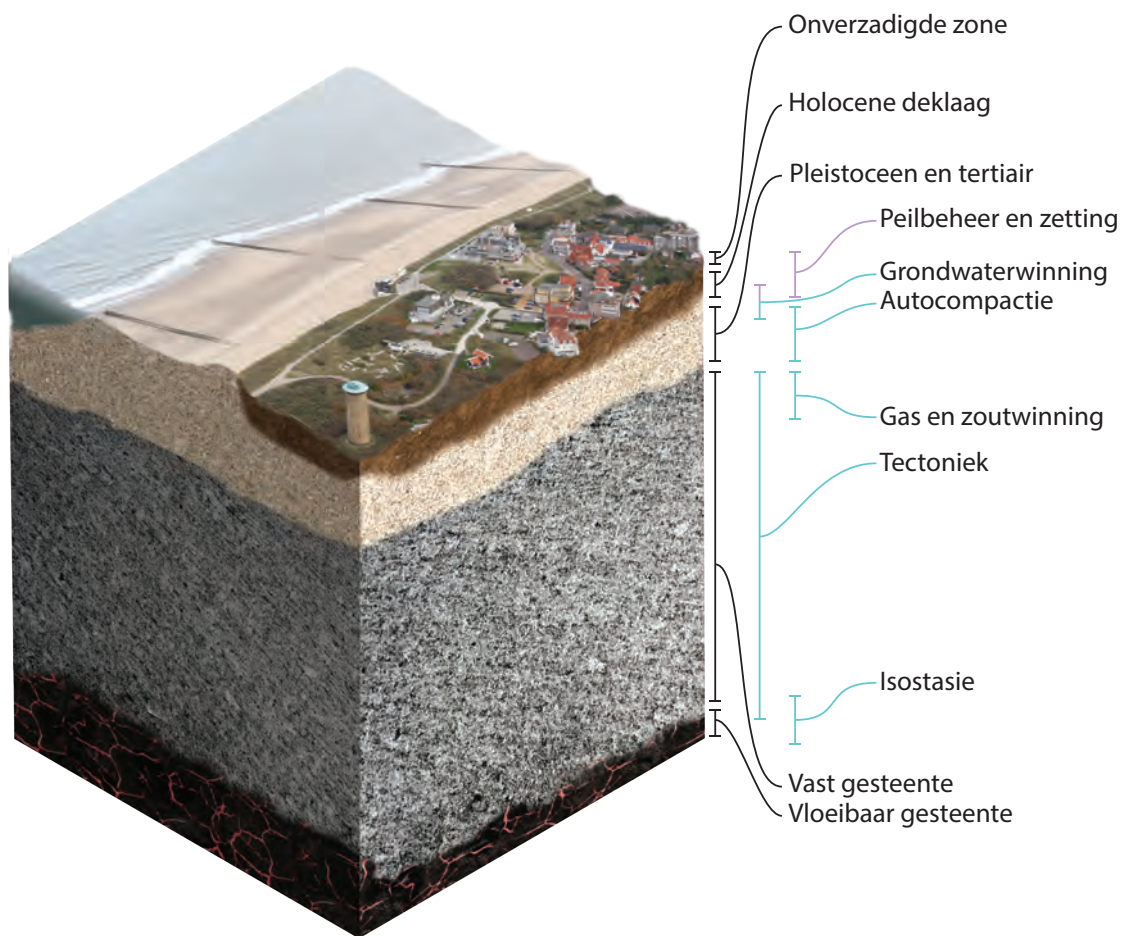
2.3.5 Bodemdaling

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),

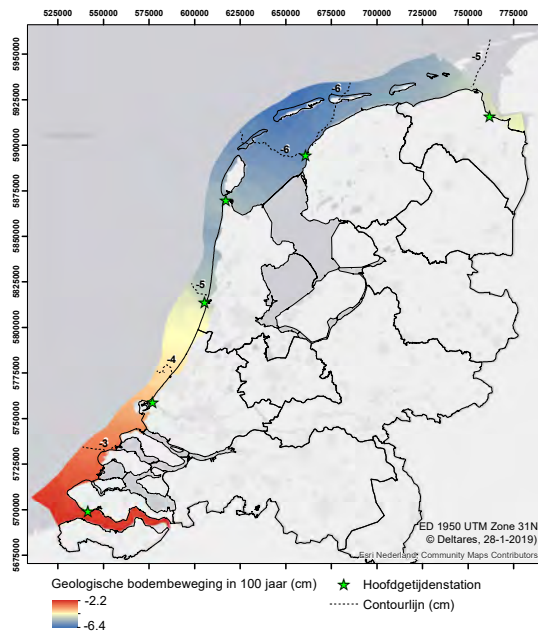


Figuur 2.11: Lagen van de bodem en oorzaken van bodemdaling aan de Nederlandse kust. Blauwe oorzaken zitten in de relatieve zeespiegelstijgingsmetingen. De paarse oorzaken niet.

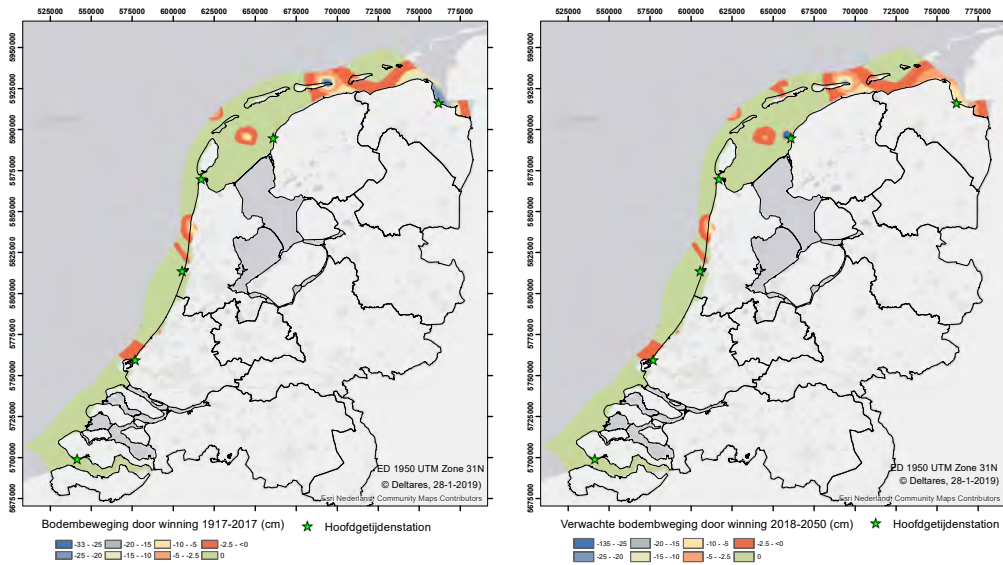
Tabel 2.2: Oorzaken van bodemdaling, naar (Hijma and Kooi, 2017).

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 Mm³ 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 Mm³ per jaar (met een maximum van 16 miljoen Mm³ 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 gearchieveerd 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/minutes 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.