



## Zeespiegelmonitor

2022



# Zeespiegelmonitor

2022

## **Auteurs**

Willem Stolte, Fedor Baart, Sanne Muis, Marc Hijma, Marcel Taal (Deltares) Dewi Le Bars, Sybren Drijfhout (KNMI) met bijdragen van HKV.

Meetstation IJmuiden, foto van nap-info.

# Zeespiegelmonitor

2022

<b>Opdrachtgever</b>	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat/DG Water en Bodem
<b>Contactpersoon</b>	
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Zeespiegel, Zeespiegelstijging, Bodemdaling

## Document controle

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	03-27-2023
<b>Projectnummer</b>	11208038
<b>Document ID</b>	11209266-000-ZKS-0001
<b>Pagina's</b>	151
<b>Status</b>	definitief

## Auteur(s)

	Willem Stolte, Fedor Baart, Sanne Muis, Marc Hijma, Marcel Taal (Deltares), Dewi Le Bars, Sybren Drijfhout (KNMI)	Deltares

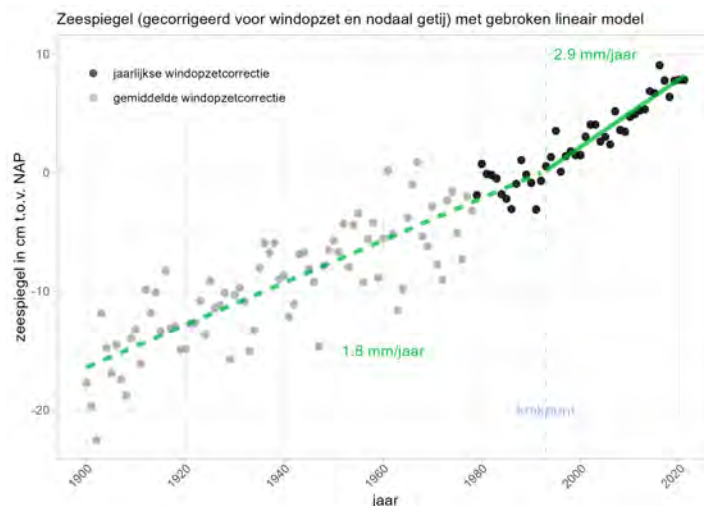
# Samenvatting

Sinds 2014 onderhoudt Deltares in opdracht van Ministerie van I&W de Zeespiegelmonitor. Doel is de stand en ontwikkeling van de zeespiegel vast te stellen, ter ondersteuning van het waterveiligheidsbeleid. Het gaat met name om de gemiddelde hoeveelheid jaarlijks te suppleren zand en het toetsen en ontwerpen van de primaire waterkeringen.

De Zeespiegelmonitor stelt jaarlijks de stand van de zeespiegel vast van de zes Nederlandse hoofdgetijdenstations (Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen), die continu de waterstand vastleggen/meten. De methodiek voor de Zeespiegelmonitor is in 2014 vastgesteld en berekent de langjarige trend. Bij deze berekening wordt rekening gehouden met de verschillende factoren die de fluctuaties in waterstanden beïnvloeden. Wind en getij zijn daarvan de belangrijkste. Het resultaat van de zeespiegelmonitor wordt representatief geacht voor de gemiddelde zeespiegelstijging in de komende ca 15 jaar. Iedere vier jaar wordt gerapporteerd over de waarnemingen en de onderzoeksresultaten. Dit is de derde rapportage.

In de vorige twee rapportages is geconcludeerd dat, cf. de methodiek, een constante trend, sinds 1900, de beste beschrijving geeft van de trend. In deze rapportage wordt een andere conclusie onderbouwd/getrokken. De stijging van de zeespiegel langs de Nederlandse kust kan nu het best beschreven worden door een trend tot circa 1990 van  $1.8 \pm 0.1$  mm/jaar, met een toename van de gemiddelde jaarlijkse stijging over de laatste 30 jaar van  $2.9 \pm 0.4$  mm/jaar. Deze toename past bij de verwachting, op basis van de kennis over de wereldwijde stand van de zeespiegel, van een langzaam opbouwende versnelling van de zeespiegelstijging.

Voor de komende ca 15 jaar is een trend van 2.9 mm/jaar een verantwoorde benadering. De methodiek toegepast in de zeespiegelmonitor, is niet geschikt voor een berekening van de trend over de periode daarna.



Figuur 1 De verandering van de zeespiegeltrend in de tijd.

Uit bovenstaande figuur zijn drie belangrijke boodschappen te halen:

- In Nederland is een versnelling van de zeespiegelstijging waarneembaar. De stijging is in de komende decennia naar verwachting hoger dan de trend in de

- vorige eeuw.
- De gegevens vanaf 1979 vertonen een kleinere onzekerheid dan daarvoor. Dit komt door een meer nauwkeurige correctie voor windopzet. Dat verhoogt de nauwkeurigheid van de beschrijving van de lokale zeespiegelstijging in recente tijdvakken.
  - De jaar op jaar variatie van de zeespiegel (ca.  $\pm 10$  cm) is veel groter dan de onzekerheid in de langjarige trend (ca.  $\pm 0.4$  mm/jaar).

In deze zeespiegelmonitor zijn de gegevens van vijf van de zes Nederlandse stations gebruikt. Er is namelijk reden om aan te nemen dat de gegevens van het station Delfzijl nu niet betrouwbaar genoeg zijn, met name veroorzaakt door de snelle bodemdaling. De overige stations vertonen onderling vergelijkbare trends in de stijging sinds 1993, namelijk tussen 2.3 en 3.3 mm per jaar.

# Inhoudsopgave

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Lijst van tabellen</b>	<b>9</b>
	<b>Lijst van figuren</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>13</b>
1.1	Onderzoeksvragen	13
1.2	Leeswijzer	15
1.3	Review	15
<b>2</b>	<b>Methoden</b>	<b>16</b>
2.1	Afwegingen	16
2.2	Algemene methodiek	16
2.3	(Meet)gegevens	17
2.4	Tijdschaal	18
2.5	Welke termen?	19
2.5.1	Versnelling?	19
2.6	Getij	21
2.7	Wind	21
2.8	Residu	22
2.9	Gedetailleerde vergelijking	22
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>24</b>
3.1	De huidige zeespiegel	24
3.2	Vergelijking met eerdere analyse	25
3.3	Nodaal getij	27
3.4	Windopzet	27
3.5	Stijgt de zeespiegel versneld?	28
3.6	Verwachting voor komende jaren	28
3.7	Per station	29
3.8	Bodemdaling of zeespiegelstijging?	31
3.9	Vergelijking van scenario's versus de huidige zeespiegel	32
3.10	Nederland versus buurlanden	34
3.11	Vergelijking met satellietmetingen	34
3.12	Modelkeuzes en aannames	37
<b>4</b>	<b>Discussie</b>	<b>38</b>
4.1	Toepassingsbereik van de gebruikte methode	38
4.2	Waarom nu een versnelling	39
4.3	Verschillen binnen Nederland	40
<b>5</b>	<b>Referenties</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Lijst met afkortingen</b>	<b>50</b>
<b>B</b>	<b>Aansluiting en raakvlakken</b>	<b>52</b>
<b>C</b>	<b>Rapporten en memo's</b>	<b>55</b>
C.1	Verslag workshop Zeespiegelmonitor methodiek**	55
C.2	Verslag workshop onderzoeksagenda 2023-2025	61
C.3	Producten met samenvatting over de laatste periode (2019-2022)	72
C.4	Oudere producten relevant voor deze Zeespiegelmonitor	74

<b>D</b>	<b>Ad hoc vragen</b>	<b>76</b>
<b>E</b>	<b>Datasets en archivering</b>	<b>91</b>
<b>F</b>	<b>Oorzaken zeespiegelverandering</b>	<b>93</b>
F.1	Definitie zeespiegelstand	93
F.2	Methoden	95
F.3	Mondiale zeespiegelstijging	95
F.3.1	Sinds de laatste ijstijd	96
F.3.2	Veranderingen in dichtheid	98
F.3.3	Massaveranderingen, gletsjers, landijs en zeeijs	99
F.4	Regionale and lokale processen	101
F.4.1	Gravitatie	101
F.4.2	Circulaties	102
F.4.3	Luchtdruk	103
F.4.4	Wind	104
F.4.5	Getij	104
F.4.6	Bodemdaling	105
<b>G</b>	<b>Toepassingen</b>	<b>111</b>
G.1	Kustbeheer	111
G.2	Delfstoffenwinning	112
G.3	Ontwerp	113
G.4	Toetsing/beoordeling	114
G.5	Percentage onder zeeniveau	114
G.6	Zeespiegel over 200 jaar	115
G.7	Signalering	116
G.8	Trends in toepassingen van de zeespiegel	116
<b>H</b>	<b>Metingen</b>	<b>118</b>
H.1	Getijdestations	118
H.1.1	Vlissingen	120
H.1.2	Hoek van Holland	120
H.1.3	Ijmuiden	120
H.1.4	Den Helder	122
H.1.5	Harlingen	122
H.1.6	Delfzijl	124
H.2	Verticale referentieniveaus	124
H.2.1	Het NAP en de nulpalen	125
H.2.2	NAP historie	126
H.3	Satellietmeting van de zeehoogte	127
<b>I</b>	<b>Varianten</b>	<b>129</b>
I.1	Tijdseries met en zonder wind en/of surge	129
I.1.1	GTSM en lineair model	129
I.1.2	GTSM en gebroken lineair model	129
I.1.3	GTSM en kwadratisch model	129
I.1.4	GTSM en gebroken kwadratisch model	129
I.1.5	NCEP1 en lineair model	129
I.1.6	NCEP1 en gebroken lineair model	129
I.1.7	NCEP1 en kwadratisch model	129
I.1.8	NCEP1 en gebroken kwadratisch model	129
I.1.9	20CR en lineair model	129
I.1.10	20CR en gebroken lineair model	139
I.1.11	20CR en kwadratisch model	139

I.1.12	20CR en gebroken kwadratische model	139
I.1.13	Combined en lineaire model	139
I.1.14	Combined en gebroken lineaire model	139
I.1.15	Combined en kwadratisch model	139
I.1.16	Combined en gebroken kwadratisch model	139
I.1.17	Alle windopzet varianten	139
I.1.18	Nodaal getij	139
I.1.19	Effect van modelkeuze op de huidige trend.	139
I.2	Vergelijking van de trends tussen stations, en tussen de verschillende methoden	139
I.3	AIC bij gebruik van wind correcties	148



# Lijst van tabellen

3.1	Kengetallen voor de huidige zeespiegelstand (2021).	24
3.2	Constante (als zeespiegel in 1970), trends en standaardfouten voor de 6 hoofdstations apart, berekend voor het gebroken lineaire model.	30
3.3	Uitsplitsing bodemdaling en zeespiegelstijging per station (bodemdaling uit M. P. Hijma and Kooi 2018). Tectoniek + isostasie, Winningen en Bodemdaling zijn berekend over de periode 1917-2017. Bodemdaling is voor Delfzijl exclusief winning voor Hoek van Holland inclusief (zie tekst). Gemiddelde relatieve zeespiegelstijging is gemeten over de periode 1993-2021 (gebroken lineair model).	31
3.3	Uitsplitsing bodemdaling en zeespiegelstijging per station (bodemdaling uit M. P. Hijma and Kooi 2018). Tectoniek + isostasie, Winningen en Bodemdaling zijn berekend over de periode 1917-2017. Bodemdaling is voor Delfzijl exclusief winning voor Hoek van Holland inclusief (zie tekst). Gemiddelde relatieve zeespiegelstijging is gemeten over de periode 1993-2021 (gebroken lineair model).	32
E.1	Verklaring van tabel 'gegevens per station'	92
E.2	Verklaring van tabel dutch-sea-level-monitor-export	92
F.1	Frequenties van het getij [@Doodson1921]	104
F.2	Oorzaken van bodemdaling, naar (M. Hijma and Kooi 2017).	106
G.8	Trends in zeespiegel indicatoren	116

# Lijst van figuren

1	De verandering van de zeespiegeltrend in de tijd.	4
2.1	Locatie van de 6 hoofdstations.	17
2.2	Schematische weergave van de verschillende modelvarianten om de zeespiegelstijging te schatten.	19
2.3	Huidige zeespiegelstijging volgens het lineaire model met verschillende correcties voor windopzet: GTSM en met geobserveerde wind (NCEP1) . De trend is gefit op de jaargemiddelde waarden voor de 5 stations.	22
3.1	Tijdserie van de zeespiegel langs de Nederlandse kust op basis van het gemiddelde van de vijf hoofdstations, zie ook paragraaf 2.3. Opzet en opzetanomalie (afwijking van de gemiddelde opzet) zijn berekend met GTSM, de predictie is op basis van een gebroken lineair model.	25
3.2	Tijdserie van gemiddelde zeespiegel (gemiddeld over hoofdstations minus Delfzijl) gecorrigeerd voor de variatie in windopzet (GTSM) en voor de variatie in nodaal getij. Trendlijnen voor het lineaire en het gebroken lineaire model zijn toegevoegd. De gegevens tot en met 2022 worden beter beschreven met het gebroken lineaire model dan met het lineaire model.	26
3.3	Het geschatte aandeel van het nodale getij op de zeespiegel voor de 5 hoofdstations gemiddeld.	27
3.4	De gemiddelde gemeten zeespiegel voor de vijf hoofdstations (zwart), de geschatte (predictie) zeespiegel (gebroken lineaire model) waarbij gecorrigeerd is voor de variatie in opzet (predictie - opzetanomalie), en de geschatte zeespiegel waarbij de windopzet is afgetrokken (predictie - opzet). Windopzet is berekend met het GTSM model (zie paragraaf 2.7).	27
3.5	Het verloop van de snelheid van zeespiegelstijging in de tijd voor de vier verschillende geteste modellen.	29
3.6	Zeespiegel en predictie volgens het gebroken lineaire model waarbij gecorrigeerd is voor windopzet (GTSM) en nodaal getij. De trend is voor de 6 getijdstations afzonderlijk weergegeven. De zeespiegel is uitgedrukt ten opzichte van post-2005 NAP. In de periode voor 1979 is gecorrigeerd voor een gemiddelde windopzet.	30
3.7	Zeespiegeltrends voor en na 1993 (gebroken lineaire model) per station, in vergelijking met de trend bij gebruik van het lineaire model (zwarte horizontale strepen).	31
3.8	Zeespiegelprojecties (mediaan midden scenario SSP245) met 5 en 95 percentiel uit KNMI klimaatsignaal 2021 (KNMI 2021) gecorrigeerd voor referentieperiode en omgerekend naar NAP vergeleken met metingen gemiddeld over de 5 hoofdstations en gecorrigeerd voor windopzet (GTSM) en getij.	33
3.9	Zeespiegelmetingen van diverse stations in Frankrijk, België, Denemarken, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk.	35
3.10	Gemiddelde snelheid van de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust op basis van satellietmetingen. De snelheid is berekend door een lineair model over de periode 1993 - heden. De berekening is gedaan met deze NASA webtool. De berekende zeespiegelstijging over de periode 1993 - 2015 is $0.000182 * 12$ maanden * 100 cm = 0.22 cm/jaar	36
F.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.	94

F.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 seizoenenvariatie is in beide figuren verwijderd door over het jaar te middelen.	97
F.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.	98
F.4	Zeespiegeloppervlakte temperatuur, globaal (ERSST v5, boven) en in de Noordzee (ERSST v5 en Rijkswaterstaat (RWS) stations, onder) .	99
F.5	Overzicht van zeespiegel trends op basis van satellietmetingen (1993-2014).	101
F.6	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 lijnen geven aan waar de stijging evenredig is met de smelting, licht rode en blauwe vakken krijgen minder dan gemiddelde zeespiegelstijging, donker rode vlakken meer dan gemiddeld. Uit Hsu and Velicogna (2017).	102
F.7	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.	103
F.8	Atlantische Multidecadale Oscillatie, een hoge waarde hangt samen met een warme Noord Atlantische Oceaan, data: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).	103
F.9	Amplitude van Principal lunar semidiurnal constituent (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).	105
F.10	Lagen van de bodem en oorzaken van bodemdaling aan de Nederlandse kust. Blauwe oorzaken zitten in de relatieve zeespiegelstijgingsmetingen. De parse oorzaken niet.	107
F.11	Bodemdaling door tektoniek en isostasie, uit M. P. Hijma (2022).	108
F.12	Bodemdaling door winningen (verleden, verwacht), uit M. P. Hijma (2022).	109
G.1	Beschermingszones Callantssoog	117
H.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).	119
H.2	Meetstation Hoek van Holland. Bron: napinfo.	121
H.3	Meetstation IJmuiden. Bron: napinfo.	121
H.4	Meetstation Den Helder. Bron: napinfo.	122
H.5	Meetstation Harlingen. Bron: napinfo.	123
H.6	Meetstation Delfzijl. Bron: napinfo.	123
H.7	Overzicht van de historie van de NAP merken in de buurt van de meetstations. Relatief ten opzichte van de eerste meting. (nulpalen). bron: nap-info	127
I.1	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het lineaire model voor alle stations.	130
I.2	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.	131
I.3	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het kwadratische model voor alle stations.	132

I.4	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het gebroken kwadratische model voor alle stations.	133
I.5	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het lineaire model voor alle stations.	134
I.6	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.	135
I.7	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het kwadratische model voor alle stations.	136
I.8	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het gebroken kwadratische model voor alle stations.	137
I.9	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het lineaire model voor alle stations.	138
I.10	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.	140
I.11	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het kwadratische model voor alle stations.	141
I.12	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken quadratische model voor alle stations.	142
I.13	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het lineaire model voor alle stations.	143
I.14	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.	144
I.15	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het kwadratische model voor alle stations.	145
I.16	Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken kwadratische model voor alle stations.	146
I.17	Windopzet berekend met GTSM en geschat met de verschillende wind heranalyses en modelvarianten met predictieinterval.	147
I.18	Geschat nodaal getij voor alle varianten. Alleen de periode vanaf 2000 wordt getoond om de verschillen in fase beter te kunnen zien. De amplitude en fase zijn over de hele periode constant.	148
I.19	Schatting van de huidige zeespiegel en trend voor alle stations, windopzetcorrecties en modelkeuzen.	149
I.20	Vergelijking tussen de zeespiegelstijging vanaf 1979 voor alle stations, windopzetcorrecties en modelkeuzen.	150
I.21	Berekende trends voor het lineaire model (zwarte punten), en de pre- en post-1993 trend voor het broken linear model (kolommen).	150

# 1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de lange-termijn ontwikkeling van de hoogte van de gemiddelde zeespiegel langs de Nederlandse kust gebaseerd op metingen op zes hoofdstations. Dit gebeurt volgens een methodiek die is ontwikkeld in dienst van het Nederlandse kustbeleid. De hoeveelheid zandsuppleties die nodig is om de Nederlandse kust te handhaven is namelijk afhankelijk van de opgetreden relatieve zeespiegelstijging (de stijging ten opzichte van een land dat ook bodemdaling kent) op een tijdschaal van ca 15 jaar. De ontwikkelde methodiek bepaalt de gemiddelde zeespiegelstijging door filtering van korte-termijn fluctuaties (veroorzaakt door golven, getij, windopzet etc.) uit historische data. De schatting van de recente gemiddelde zeespiegelstijging wordt als indicatie gebruikt voor de verwachte zeespiegelstijging in de nabije toekomst<sup>1</sup>. In het [syntheserapport van Kustgenese 2.0](#) is uitgebreid uiteengezet hoe het benodigde zandvolume wordt vastgesteld.

Het zand is nodig om invulling te geven aan het kustonderhoudsdoel dat we meegroeien met de zeespiegel. Omdat het gaat om een aanvulling wordt de hoeveelheid zand die hiervoor nodig is achteraf bepaald. Om die reden beschouwen we in deze rapportage de opgetreden zeespiegel tot nu toe. Voor budgetplanning en signalering is ook de zeespiegel in de nabije toekomst van belang.

Behalve voor de bepaling van de jaarlijkse suppletiehoeveelheid is de opgetreden zeespiegelstijging van belang voor de vergunningen rondom zout- en gaswinning in het Waddengebied en voor ontwerpparameters van waterkeringen. Dit uiteraard naast algemenere doeleinden, waaronder het informeren van het publiek. Een overzicht van de indicatoren en toepassingen staat in bijlage G. Voor een deel van deze indicatoren wordt gebruik gemaakt van zeespiegelprojecties.

In de [rapportage 2018](#) is een uitgebreid overzicht te vinden van eerder onderzoek en hoe deze tot keuzes in de methodiek leidden. De rapportage 2018 doet ook verslag van onderzoek om tot nauwkeuriger waarden voor de zeespiegel te komen. Het rapport geeft ook aanbevelingen aangaande de aansluiting van metingen en projecties en versterken van de reproduceerbaarheid.

De methode die is gebruikt voor de bepaling van de zeespiegel en stijging ervan staat in hoofdstuk 2. De waarden worden elk jaar geactualiseerd in de online zeespiegelmonitor.

Voorliggend rapport heeft ook als doel een verslag te geven van het onderzoek dat in de afgelopen jaren is gedaan. De keuzes in dat onderzoek volgen uit de vooraf opgestelde onderzoeksagenda. In paragraaf 1.1 staat een overzicht. Een aantal onderzoeken zijn ook als aparte memo's of rapporten gepresenteerd. Dit staat aangegeven in het overzicht.

## 1.1 Onderzoeksvragen

Dit rapport heeft als doel om een overzicht te geven van het onderzoek dat in de afgelopen jaren is gedaan in het kader van het onderzoek Kustbeleid. Vanaf 2018 is er richting gegeven aan dit onderzoek vanuit een met de opdrachtgevers afgestemde onderzoeksagenda. In dit rapport worden deze centrale vraagstellingen beantwoord.

---

<sup>1</sup>Zie voor nadere uitwerking @Dillingh2010

### **Jaarlijkse zeespiegelmonitor**

- Wat is de huidige stijging van de zeespiegel? Wat zijn de laatste ontwikkelingen op het gebied van de toestand van de globale en lokale zeespiegel?

Deze vraag wordt beantwoord in paragraaf 3.1.

### **Aansluiting metingen en projecties**

- Probeer afstemming te bereiken tussen de verschillende methoden van het gezamenlijk presenteren van projecties en zeespiegelmetingen

Deze vraag wordt beantwoord in de memo [Methode voor visualisatie van tijdreeksen en scenario's voor zeespiegelstijging \(concept versie voor discussie\)](#)

### **Uitsplitsing oorzaken voor zeespiegelstijging**

- Stap over op het GTSM model als basis voor wind en stormopzet effecten.

Deze methode wordt verder uitgelegd in paragraaf 2.7, de resultaten worden gepresenteerd in paragraaf 3.1.

- Er zijn een aantal mogelijke bronnen van afsmelten op Antarctica. Wat is hun individuele bijdrage aan de stijging van de zeespiegel aan de Nederlandse kust. Welke moeten we "in de gaten houden"?

De uitwerking hiervan staat in de memo "[Visualizing changes of the Antarctic Ice Sheet](#)" (Fedor Baart and Donchyts 2020)

### **Verbetering meetmethoden**

- Hoe kunnen we het Landelijk Meetnet Water op het gebied van relatieve zeespiegelstijging optimaliseren

De uitvoering van deze vraag is uiteindelijk binnen een ander project opgepakt. Een aanbeveling was om de verticale nauwkeurigheid te verhogen door het plaatsen van [Global Navigation Satellite System \(GNSS\)](#). Meer informatie over de verticale referentie van meetstations staat in bijlage H.

### **Gezamenlijkheid**

- Probeer afstemming of aansluiting te bereiken tussen de verschillende zeespiegelindicatoren voor bepaling van huidige zeespiegelstijging en versnellingsdetectie tussen Deltaprogramma, TNO, PBL en Deltares.

De resultaten hiervan worden gepresenteerd in de memo [Advies kenmerkende waarden kust : overzicht zeespiegelindicatoren \(Nicolai and Verkaik 2020\)](#)

### **De boel onder controle?**

- Voor welke zeespiegelstijging zijn de huidige Deltawerken ontworpen? Welke resterende zeespiegel is er over ten opzichte van het oorspronkelijke ontwerp, rekening houdend met bijgestelde normen? In hoeverre zijn de Deltawerken adaptief?

Een uitwerking van deze vraag staat in de memo [Zeespiegelstijging in ontwerpnormen stormvloedkeringen : inventarisatie van zeespiegelstijging in ontwerpnormen van de Oosterscheldekering en de Maeslantkering \(Oerlemans et al. 2022\)](#)

### **Archivering**

- Stel een archiveringsplan op om historische gegevens en documenten omtrent de

zeespiegelmetingen beter te borgen. Voer archivering uit en beschrijf de resultaten van de archivering.

Er lopen met Rijkswaterstaat verschillende trajecten om documentatie te verwerken over de zeespiegelmetingen, zie voor meer informatie paragraaf E

## 1.2 Leeswijzer

Dit rapport behandelt in detail de resultaten van de Zeespiegelmonitor. Actuele resultaten zijn te vinden in een jaarlijks bijgewerkt [rekendocument](#). Dit rapport geeft uitleg bij de methodiek (hoofdstuk 2), en geeft de resultaten op een overkoepelend niveau weer (hoofdstuk 3).

Een deel van het onderzoek binnen het Zeespiegelmonitorproject is gepubliceerd in aparte memo's en rapporten. Samenvattingen en links naar de originele rapporten zijn te vinden in de bijlage C

In bijlage C is achtergrondinformatie en rapporten te vinden die in de afgelopen periode (2019-2022) in het kader van de Zeespiegelmonitor zijn verzameld.

De hoofdstukken Oorzaken (bijlage F), Toepassingen (bijlage G), en Metingen (bijlage H) in de appendix zijn geactualiseerde versies van de gelijknamige hoofdstukken uit Fedor Baart et al. (2019).

In bijlage I worden resultaten gepresenteerd voor de verschillende varianten die zijn doorgerekend.

Merk op dat de digitale versie van dit document voorzien van hyperlinks voor figuren, tabellen, en referenties. Hiermee kunt u klikken naar de juiste pagina voor meer informatie. Dit geldt ook voor verwijzingen naar acroniemen waarmee u bij het overzicht van afkortingen kunt komen, te vinden in [@ref{lijst-met-afkortingen}](#).

Citaten in de vorm van (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.

## 1.3 Review

Dit rapport is extern en intern gereviewd.



## 2 Methoden

In hoofdstuk 1 wordt uitgelegd dat er een 'huidige zeespiegel' nodig is, onder andere om de suppletiebehoefte te bepalen. Huidig is in de context van deze toepassing eigenlijk geen tijdstip, maar een tijdsspanne. Het gaat niet om de zeespiegel vandaag, maar om de zeespiegel van enkele jaren terug tot nu.

In de bijlage H wordt uitgelegd hoe de metingen tot stand komen.

### 2.1 Afwegingen

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. Uitgangspunt voor de afwegingen is het bepalen van een goede maat voor de huidige zeespiegelstijging ten behoeve van het suppletieprogramma en de suppletiebehoefte.

**Stabiliteit** - de gebruikte methodiek moet niet van jaar tot jaar te veel variëren.

**Spaarzaamheid** - parcimonie: principe dat de eenvoudigste van twee ongeveer even plausibele verklaringen voor hetzelfde fenomeen de voorkeur heeft

**Robuustheid** - trend moet niet te veel afhangen van modelkeuzes

**Voorspelkracht** - toepassing van model in het verleden moet een goede hindcast opleveren voor een voorspelhorizon die vergelijkbaar is met de lengte van de gewenste periode (10-15 jaar)

**Behoudend** - methode moet temporeel aansluiten oftewel over de gehele periode met metingen toepasbaar zijn zonder onderbreking of verspringing.

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

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

**Fysisch verklaarbaar** - de gekozen formulering moet verklaarbaar zijn vanuit fysisch oogpunt

### 2.2 Algemene methodiek

In dit onderzoek maken we gebruik van een **Generalized Linear Model (GLM)**, een gegeneraliseerde vorm van een lineair regressiemodel. Vooral omdat de variatie goed verklaard wordt (Watson 2016). We gaan er vanuit dat de zeespiegel sneller aan het stijgen is of binnenkort sneller gaat stijgen dan in het verleden (ruwweg de twintigste eeuw)<sup>1</sup>. Dit heeft implicaties voor de verwachte zeespiegel en zeespiegelstijging. Daarom maken we gebruik van schattingen van de versnelling, zie 2.5.1. 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

<sup>1</sup>Zie ook laatste IPCC rapport: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-9/>





Figuur 2.1 Locatie van de 6 hoofdstations.

familie.

## 2.3 (Meet)gegevens

In dit onderzoek maken we gebruik van gegevens voor de 6 zogenaamde hoofdstations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder, Harlingen en Delfzijl. Deze kuststations leveren sinds 1890, toen het [Normaal Amsterdams Peil \(NAP\)](#) overal was doorgevoerd, betrouwbare metingen. In De Ronde et al. (2013) is de methode Zeespiegelmonitor op de 6 hoofdstations toegepast. Gegevens worden betrokken uit de [Permanent Service for Mean Sea Level \(PSMSL\)](#) database. Rijkswaterstaat draagt zorg voor de aanlevering van gegevens aan [PSMSL](#).

De overige stations waarvan gegevens in [PSMSL](#) opvraagbaar zijn worden niet gebruikt. 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. Roompot Buiten is in de Zeespiegelmonitor niet meegenomen als hoofdstation.

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.

Op dit moment is van Station Delfzijl onzeker of de verticale positie de laatste 10-15

jaar correct is doorgevoerd. (Honingh, Leenders, and Strijker 2021). Zij schrijven:

Delfzijl is het enige hoofdgetijdenstation waarvan de nulpaal niet tot het primaire meetnet behoort. Dit komt doordat de olie, gas en zoutwinning hebben geresulteerd in onstabiele merken in het grootste deel van Friesland en Groningen, waardoor deze niet deel uitmaken van het primaire net. Dit betekent dat Delfzijl alleen met secundaire waterpassingen wordt ingemeten. Omdat Delfzijl tot een zakkingsgevoelig gebied behoort, worden eens per 5 jaar secundaire waterpassingen uitgevoerd in dit gebied. Tijdens deze waterpassingen worden zowel de nulpaal en de M-bout ingemeten. De laatste jaren zijn hoogtewijzingen bij Delfzijl echter niet goed doorgevoerd voor de waterstandsmetingen. De laatste hoogtewijziging van de nulpaal bij Delfzijl is doorgevoerd in 2013 (hoogte=4,247 m+NAP), terwijl de laatste regionale waterpassing in 2018 (hoogte=4,220 m+NAP) is uitgevoerd (Kremers, 2021 & Alberts, 2020). Ook zijn er in de periode 2015-2020 geen B0-correcties geweest, omdat de maximale geconstateerde afwijking 3 mm was. Echter worden de B0-metingen ten opzichte van de M-bout ingemeten, maar de M-bout wordt nu niet jaarlijks ingemeten ten opzichte van de nulpaal. Dit is wel noodzakelijk omdat de nulpaal en de M-bout onafhankelijk van elkaar bewegen.

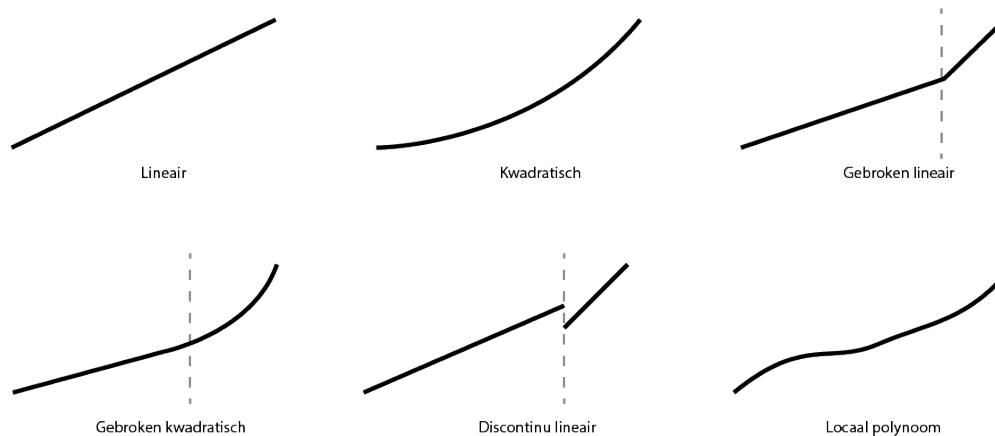
Rijkswaterstaat heeft begin 2022 geconstateerd dat een inhaalslag nodig is voor de verticale correctie van de waterstandsmetingen bij Delfzijl. Deze correctie wordt begin 2023 verwacht. Vanwege deze onzekerheid berekenen we de zeespiegel en -stijging ook op basis van het gemiddelde van alleen de 5 andere hoofdstations. Het weglaten van gegevens van Delfzijl leidt tot informatieverlies, maar het meenemen van dit station zou kunnen leiden tot fouten. We kiezen hier voor het vermijden van fouten. Zogauw er gecorrigeerde waarden voor Delfzijl beschikbaar zijn, kan de analyse met alle zes hoofdstations herhaald worden. De verwachting is dat dit in de eerste helft van 2023 gebeurt (mondelinge communicatie, Rijkswaterstaat).

Een andere bron van gegevens zijn altimetriemetingen via satellieten. Voor de Noordzee zijn sinds 1993 gegevens beschikbaar gegridd 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. Meer informatie staat in paragraaf H.3.

Voor de huidige zeespiegel wordt het gemiddelde van de hoofdstations Vlissingen, Hoek van Holland, IJmuiden, Den Helder en Harlingen gebruikt.

## 2.4 Tijdschaal

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 worden veroorzaakt door seizoensgedrag in zowel wind, luchtdruk als temperatuur/dichtheid. 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.



Figuur 2.2 Schematische weergave van de verschillende modelvarianten om de zeespiegelstijging te schatten.

## 2.5 Welke termen?

De methode in dit onderzoek bouwt verder op de aanpak zoals beschreven in F. Baart et al. (2015). De variatie in de zeespiegel wordt in een aantal componenten uitgesplitst. Het uitsplitsen van de variatie van jaargemiddelde zeespiegel wordt gedaan met behulp van een GLM. Een lineair model wordt gebruikt als onderdelen tot elkaar optellen. In deze sectie beschrijven we welke termen in dit model meegenomen worden en waarom.

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

$$h_t = \text{constante} + \text{trend} + \text{versnelling?} + \text{getij} + \text{wind} + \text{residu} \quad (2.1)$$

De versnelling is optioneel (zie sectie 2.5.1). In (2.2) is de gedetailleerde wiskundige vergelijking van het regressiemodel voor de zeewaterstand opgenomen.

### 2.5.1 Versnelling?

We gaan er niet vanuit dat de zeespiegel altijd een lineaire trend zal blijven volgen. Daarom geven we het model de mogelijkheid om een versnelde of vertraagde zeespiegel uit te rekenen.

Om de versnelling van de zeespiegel te beschrijven zijn er in de literatuur verschillende varianten in omloop. Deze worden hieronder schematisch weergegeven en beschreven.

1. Een *lineaire* aanpak gaat ervan uit dat de versnelling afwezig is. Deze methode wordt toegepast door NOAA voor [historische reeksen](#). Vanuit het spaarzaamheidsprincipe veronderstellen we dat dit model geldt (nulhypothese) tenzij het verworpen wordt.
2. 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 (2.1)). Op de significantie van deze parameter wordt statistisch getoetst. Deze methode wordt weergegeven met vergelijking (2.4).

3. De *gebroken lineaire* methode gaat ervan uit dat de zeespiegelstijging abrupt versneld is. Een abrupte versnelling kan optreden als een groot gebied tegelijk boven het 0 punt komt te liggen. In de praktijk wordt het ook gebruikt om een aparte trend uit te rekenen voor het satelliettijdperk. Sinds 1993 (na de lancering van de [TOPEX/Poseidon](#) satelliet) meten we de zeespiegel ook met satellieten. 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, Qin, Plattner, Tignor, Allen, Boschung, Nauels, Xia, Bex, Midgley, and others 2013](#)). Om goede vergelijkingen te maken is het daarom nodig om ook voor deze periode een trend te bepalen. In deze methode kan de trendparameter vanaf het jaar 1993 wijzigen. Op de significantie van de trendbreuk wordt statistisch getoetst. Dit gebroken trendmodel wordt weergegeven in vergelijking (2.5).
4. De *gebroken kwadratische* versnelling gaat er van uit dat de zeespiegel in de jaren 60 van de vorige eeuw is gaan versnellen als gevolg van de verhoogde uitstoot van broeikasgassen na de tweede wereldoorlog ([Slangen et al. 2016](#), [Dangendorf et al. 2019](#)). Met een geavanceerd statische methode is dit ook gevonden door [Keizer et al \(submitted\)](#). Voor toepassing hier wordt vóór 1960 een lineaire toename aangenomen. De versnelling vanaf 1960 wordt berekend op de manier die hierboven is beschreven bij de kwadratische versnelling. Dit gebroken trendmodel wordt weergegeven in vergelijking (2.6).

De keuze van het model heeft implicaties voor de huidige zeespiegel, immers het bepaalt deels hoeveel zeespiegel er wordt toegekend aan veranderingen in getij of windopzet. Het is dus belangrijk om het model te kiezen dat met de grootste mogelijke waarschijnlijkheid de huidige zeespiegelstijging beschrijft. Tegelijkertijd houden we vast aan de uitgangspunten in paragraaf 2.1. De uiteindelijke modelkeuze (welk model is beter dan het simpelste, dus lineaire, model) 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](#), (een maat voor de goodness-of-fit van een model) (AIC), waarbij een afweging wordt gemaakt tussen de complexiteit en de toegevoegde waarde. Het AIC criterium is een afweging op basis van de statische eigenschappen van de verschillende modellen. Het doet geen uitspraak over de juistheid van onderliggende fysische processen.

5. Een andere methode is om een *discontinue lineaire* trend te berekenen. Door over aparte perioden trends uit te rekenen krijg je trends waarvan de intercepts niet aansluit op de vorige periode. Dit is de methode zoals gebruikt in het laatste [IPCC rapport](#). Hierbij worden trends over verschillende perioden apart uitgerekend.
6. *Lokaal polynoom* is een methode met meer vrijheidsgraden en wat exploratiever van aard. De parameters worden gebaseerd op "expert judgement" en "trial en error" ([William S. Cleveland and Loader 1996](#)). Het voordeel van deze methode is dat deze de mogelijkheid open laat van een meer variërende trend over tijd. Het nadeel is dat deze methode door het grotere aantal vrijheidsgraden ook wat meer kan "wapperen", vooral aan het uiteinde. Dat wil zeggen dat de trend aan het eind van de reeks, met nieuwe data, snel van richtingscoëfficiënt kan veranderen.

De laatste twee methoden hebben we in deze rapportage niet gebruikt vanwege de genoemde nadelen.

## 2.6 Getij

Het getij, met name de nodale cyclus, zoals beschreven in paragraaf F.4.5, wordt meegenomen als gelineariseerde amplitude en fase, in de vorm van een  $u$  en  $v$  component (vergelijking (2.2)). Het is ook mogelijk om het equilibrium getij (Fedor Baart, van Gelder, et al. 2012) op te leggen. Het equilibrium getij is het getij dat zou optreden zonder invloed van land of ondiepte op de propagatie van de getijgolf. 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; Fedor Baart, van Gelder, et al. 2012). Met het oog op de generieke toepasbaarheid en zolang er geen uitsluitel is om het anders te doen gaan we voorlopig nog uit van het geobserveerde getij.

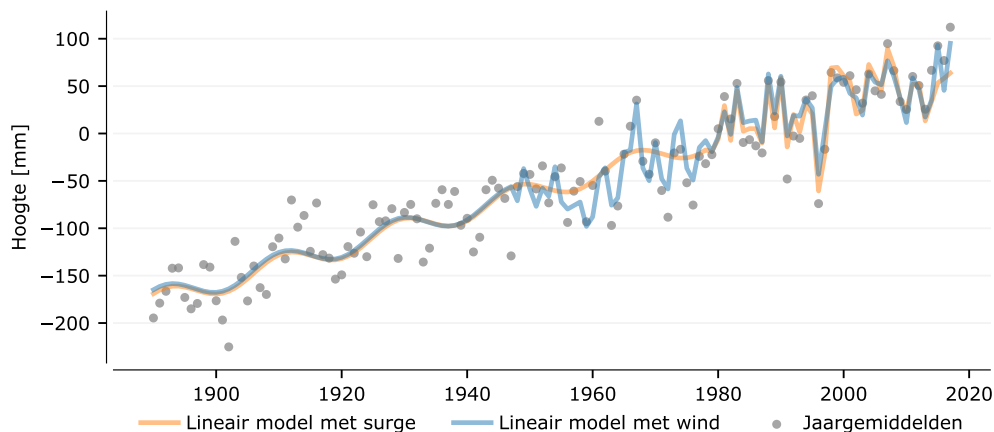
## 2.7 Wind

Omdat de Nederlandse kust aan een continentaal plat ligt, waar de wind voor een grote opslingering kan zorgen, willen we het effect van wind meenemen in de analyse. Dit is op twee verschillende manieren gedaan.

1. Door gebruik te maken 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 F. Baart et al. (2015), waar deze methode in detail beschreven staat, worden de gegevens ongeroteerd gebruikt om de gegevens generiek toepasbaar te maken. De [NCEP](#) windanalyse is beschikbaar vanaf 1949. De zeespiegelberekening is ook uitgevoerd met een alternatieve windcorrectie ([20CR heranalyse](#)). Het voordeel van deze versie is dat er heranalyses beschikbaar zijn vanaf 1836 - 2015, een veel langere periode dan de [NCEP](#). Omdat de [20th Century \(Climate\) Reanalysis \(20CR\)](#) serie niet na 2015 beschikbaar is, is er ook een gecombineerde heranalyse gemaakt, met gegevens van [20CR](#) (t/m 2015) aangevuld met [National Centers for Environmental Prediction \(NCEP1\)](#).
2. In (referentie ontbreekt, Frederikse?) is onderzocht of het gebruik van stormopzetten uit [Global Tidal Surge Model \(GTSM\)](#) (Muis et al. 2020, 2016) van toegevoegde waarde is voor het bepalen van de zeespiegelstijging. 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 test zijn de 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) (figuur 2.3). De windreeksen die als invoer in [GTSM](#) worden gebruikt zijn beschikbaar vanaf het jaar 1949. De [GTSM](#) aanpak is iets beter in het beschrijven van de extreemste jaren, en jaren met veel oostenwind zoals 1996 (figuur 2.3). Een deel van de [GTSM](#) resultaten is te vinden via de [Copernicus site](#). Voor de huidige zeespiegelmonitor is [GTSM](#) met [ERA5](#) wind forcing aangevuld tot en met 2021 voor gebruik in de zeespiegelmonitor en bestrijkt nu de periode 1979 - 2021.

Welke correctie voor windopzet gebruiken we?

In de huidige zeespiegelmonitor wordt de [GTSM](#) heranalyse gebruikt voor de opzetcorrectie. Het voordeel van deze correctie is dat de wind en stormopzet hierbij onafhankelijk van de trend wordt berekend. De resultaten met de beide andere windcorrecties ([NCEP](#), [CR20](#) en gecombineerd) worden hiernaast gepresenteerd in



Figuur 2.3 Huidige zeespiegelstijging volgens het lineaire model met verschillende correcties voor windopzet: **GTSM** en met geobserveerde wind (**NCEP1**). De trend is gefit op de jaargemiddelde waarden voor de 5 stations.

bijlage I.

## 2.8 Residu

Als in een jaar de zeespiegel iets hoger staat dan verwacht (in relatie tot het regressiemodel, een positief residu), is het iets waarschijnlijker dat het residu het daaropvolgende jaar ook positief is. Dit noemt men autocorrelatie. In de literatuur is dit, in de context van zeespiegelmetingen, 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, Dangendorf, and Petersen (2015) voor een nadere discussie.

## 2.9 Gedetailleerde vergelijking

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

$$\begin{aligned}
 h_t = & \beta_{\text{constante}} + \beta_{\text{trend}}t + \text{versnelling?} \\
 + & \beta_{\text{nodal}_u} \cos\left(\frac{2\pi t}{18,613}\right) + \beta_{\text{nodal}_v} \sin\left(\frac{2\pi t}{18,613}\right) \\
 + & \beta_{\text{wind}_u} |u|(t) + \beta_{\text{wind}_v} |v|(t) + \varphi h(t-1) + \epsilon_t \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

Hierbij is  $h_t$  de zeewaterstand in jaar  $t$ ,  $\beta_{\text{constante}}$  is het niveau van de basis zeespiegel in de epoch 1970. gedefinieerd. Parameter  $\beta_{\text{trend}}$  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  $\beta_{\text{nodal}_u}$  en  $\beta_{\text{nodal}_v}$ , (zie Fedor Baart, van Gelder, et al. 2012 voor details). De parameters  $\beta_{\text{wind}_u}$  en  $\beta_{\text{wind}_v}$  representeren de invloed van de wind en de daarmee samenhangende luchtdruk. De term  $\varphi$  is de autocorrelatie met de zeespiegelstand van het voorgaande jaar.



De vergelijking van het regressiemodel (zonder versnelling of trendbreuk) bij gebruik van de windopzet uit **GTSM** wordt de vergelijking:

$$\begin{aligned}
 h_t - surge = & \beta_{constante} + \beta_{trend}t + \text{versnelling?} \\
 + & \beta_{nodal_u} \cos\left(\frac{2\pi t}{18,613}\right) + \beta_{nodal_v} \sin\left(\frac{2\pi t}{18,613}\right) \\
 + & \varphi h(t-1) + \epsilon_t \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

waarbij  $h_t - surge$  de zeewaterstand minus de opzet uit GTSM is in jaar  $t$ .

Voor de term *versnelling?* kan voor de kwadratische versnelling de volgende term ingevuld worden:

$$\beta_{acceleration}t^2 \quad (2.4)$$

Voor de term *versnelling?* kan in vergelijking (2.2) de volgende term ingevuld worden in het geval van gebroken lineaire trend:

$$\beta_{1993}(t - 1993)(t \geq 1993) \quad (2.5)$$

Voor de term *versnelling?* kan in vergelijking (2.2) de volgende term ingevuld worden in het geval van gebroken kwadratische trend:

$$\beta_{1960}(t - 1960)(t^2 \geq 1960) \quad (2.6)$$

## 3 Resultaten

In hoofdstuk 2 hebben we vastgesteld hoe de 'huidige zeespiegel' wordt uitgerekend. In dit hoofdstuk wordt de huidige zeespiegel op basis van de periode 1890-2021 vastgesteld volgens de voorkeursmethode. De voorkeursmethode maakt gebruik van:

- Het gemiddelde over 5 hoofdstations. Er wordt een gemiddelde genomen om de onregelmatigheden van individuele stations niet al te zwaar te laten meewegen. Van de zes hoofdstations wordt Delfzijl dit keer niet meegenomen vanwege onzekerheid over de verticale referentie aldaar (zie hoofdstuk 2)
- **GTSM** wordt gebruikt voor correctie van windopzet op de zeespiegel. Deze methode zorgt voor een fysisch onderbouwde, onafhankelijke schatting van de windopzet. Nadeel is dat de beschikbare tijdreeks vrij kort is (vanaf 1979).
- Uit de verzameling modellen met en zonder versnelling is op grond van het **AIC** criterium het *gebroken lineaire* model (met breekpunt in 1993) als hoofdvariant geselecteerd (zie paragraaf 2.5.1). Dit model verklaart als enige significant beter de variatie (heeft een significant lagere **AIC**) dan de lineaire variant, rekening houdend met het verschil in vrijheidsgraden. Voor details omtrent deze analyse verwijzen we naar de bijbehorende [rekendocument](#).

De andere varianten (stations, windcorrectie, versnellingstermen) worden in bijlage I getoond.

### 3.1 De huidige zeespiegel

In figuur 3.1 is de zeespiegel uitgezet tegen de tijd. De gemeten zeespiegel is voor 2021 vastgesteld op 7.6 cm boven **NAP**.

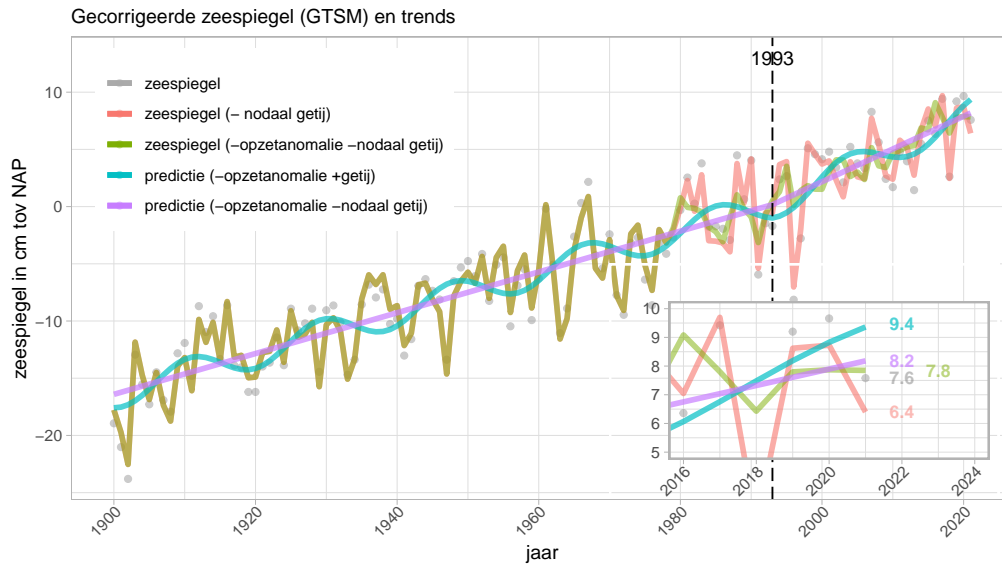
De huidige zeespiegel, dat is de zeespiegel die we verwacht hadden op basis van de opgetreden variatie in windopzet en getij, is 9.4 cm boven **NAP** (predictie -opzetanomalie +getij in figuur 3.1). De windopzet afwijking van gemiddeld was dit jaar -3.1 cm. Het berekende effect van nodaal getij was dit jaar +1.2 cm. Bij gemiddelde windopzet zou de zeespiegel 7.8 cm bedragen.

Voor het jaar 2021 bedraagt de relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust  $2.9 \pm 0.4$  mm/jaar oftewel  $29 \pm 4$  cm/eeuw. Deze trend is berekend over de periode 1993 tot en met 2021. Dit beantwoordt de vraag, hoe snel de zeespiegel op dit

Tabel 3.1 Kengetallen voor de huidige zeespiegelstand (2021).

variabele	waarde in cm
gemeten zeespiegel in cm NAP	7.6
totale windopzet in cm NAP	3.1
bijdrage nodaal getij in cm NAP	1.2
zeespiegel - windopzetanomalie in cm NAP	9
geschatte zeespiegel (-windopzet) in cm NAP	9.4
betrouwbaarheid schatting in cm	1
geschatte zeespiegel (-nodaal getij - windopzet) in cm NAP	8.2





Figuur 3.1 Tijdserie van de zeespiegel langs de Nederlandse kust op basis van het gemiddelde van de vijf hoofdstations, zie ook paragraaf 2.3. Opzet en opzetanomalie (afwijking van de gemiddelde opzet) zijn berekend met GTSM, de predictie is op basis van een gebroken lineair model.

moment stijgt. De zeespiegel stijgt nu dus sneller dan in de periode van 1890 - 1993. In die periode was de zeespiegelstijging  $1.8 \pm 0.1$  mm/jaar oftewel  $18 \pm 1$  cm/eeuw (figuur 3.1 en tabel 3.1).

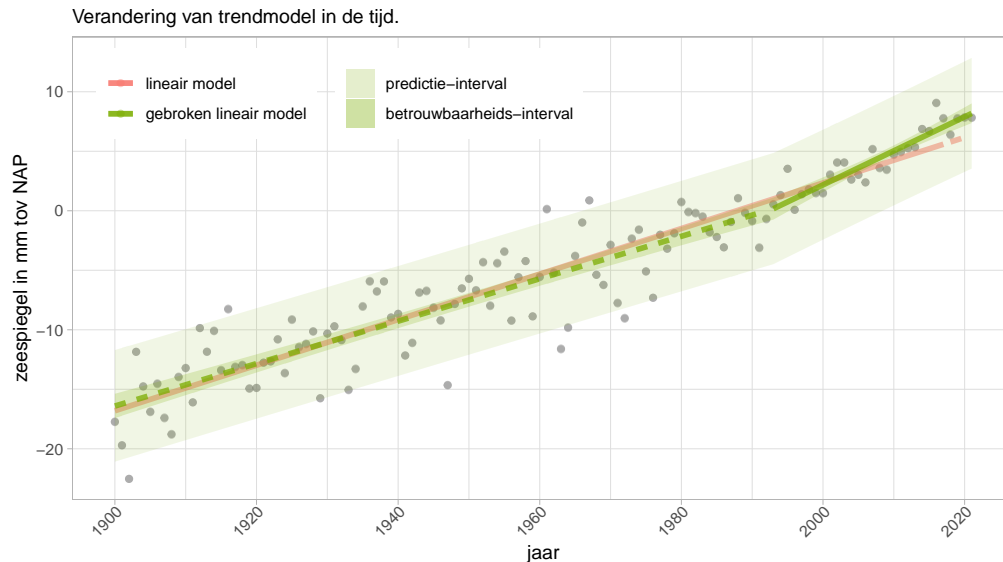
De gemeten zeespiegel aan de Nederlandse kust heeft in 2020 zijn hoogste stand ooit gemeten bereikt. Kort gezegd komt dit doordat het dat jaar flink heeft gestormd in combinatie met een opgaand nodaal getij en de gestegen zeespiegel.

De zeespiegel gecorrigeerd voor de variatie in windopzet was het hoogste in 2021. Dit was te verwachten door de stijgende zeespiegel en een opgaand nodaal getij.

## 3.2 Vergelijking met eerdere analyse

De versnelling langs de Nederlandse kust is consistent met resultaten die zijn afgeleid van mondiale zeespiegelmetingen en budgetten. Het model met versnelling was echter tot de vorige Zeespiegelmonitor (t/m meetjaar 2017) niet significant beter dan het lineaire model met de methode van de Zeespiegelmonitor (Fedor Baart et al. 2019). Daarom was over de periode 1890 - 2017 de langjarig trend constant en had de waarde 1.9 mm/jaar. De totale zeespiegelstijging over de periode 1890 - 2017 was toen bepaald op 23 cm.

Sinds 2017 zijn meer gegevens beschikbaar gekomen. De zeespiegelmetingen over de laatste vier jaar laten zien dat de stijging doorzet. Tegelijkertijd is deze keer het GTSM model gebruikt om te corrigeren voor variatie in de zeespiegel door windopzet. De nieuwe gecorrigeerde zeespiegelmetingen liggen zodanig hoog dat er voor de berekening van de langjarige trend nu wordt overgegaan van een lineair model (rechte lijn) op een gebroken lineair model (een geknikte lijn, variant 3 uit hoofdstuk 2). We doen dit omdat na testen (AIC criterium) blijkt dat het gebroken lineaire model een significant beter model is dan het lineaire model, rekening houdend met het feit dat het gebroken lineaire model ook complexer is.



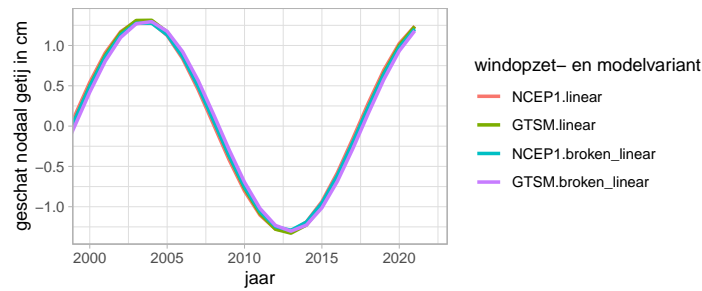
Figuur 3.2 Tijdserie van gemiddelde zeespiegel (gemiddeld over hoofdstations minus Delfzijl) gecorrigeerd voor de variatie in windopzet (GTSM) en voor de variatie in nodaal getij. Trendlijnen voor het lineaire en het gebroken lineaire model zijn toegevoegd. De gegevens tot en met 2022 worden beter beschreven met het gebroken lineaire model dan met het lineaire model.

Door over te gaan op het gebroken lineaire model wordt de zeespiegelstijging nu het beste beschreven met twee verschillende trends in de tijd. Een iets verlaagde trend in de periode van vóór 1993, namelijk 1.8 mm/jaar, en een verhoogde trend na 1993, namelijk 2,9 mm/jaar. We constateren ook dat de zeespiegel in 2021 bijna 25 cm hoger staat dan in 1890.

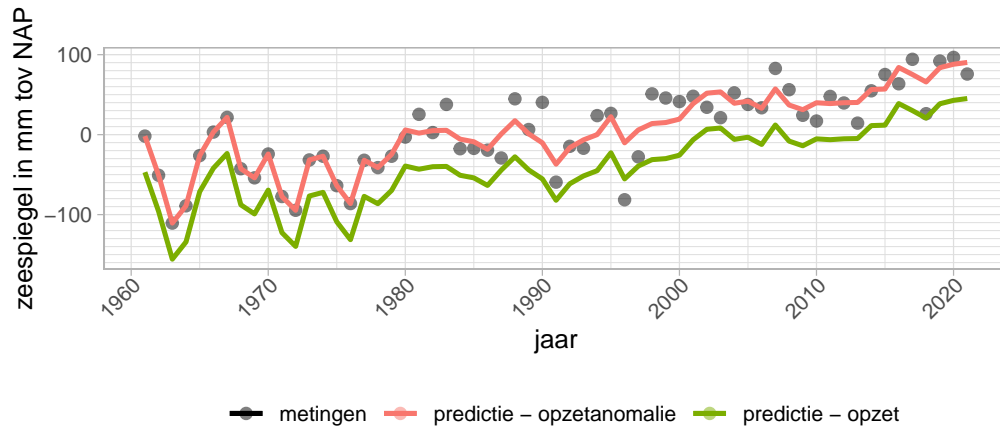
Het feit dat de geschatte zeespiegel in 2021 bijna 2 cm hoger wordt geschat dan in 2017 wordt verklaard door:

- Een werkelijk hogere zeespiegel
- De aanname dat de zeespiegel na 1993 versneld is gaan stijgen
- Een betere correctie voor windopzet. Hierdoor wordt een iets kleiner deel van de gemeten stijging toegeschreven aan variatie in windopzet.

De verhoogde stijging begint in 1993. De keuze voor dit jaar voor een versnelde stijging is gemotiveerd vanuit een [Markov chain Monte Carlo \(MCMC\) analyse \(Fedor Baart et al. 2019 sectie 6.3\)](#). Wereldwijd wordt er ook een versnelde zeespiegelstijging gevonden in de periode na 1993 in vergelijking met daarvoor ([Stocker, Qin, Plattner, Tignor, Allen, Boschung, Nauels, Xia, Bex, and Midgley 2013](#)). De keuze voor dit jaartal ligt gedeeltelijk in het feit dat vanaf dat jaar een goede mondiale dekking werd bereikt door metingen met satellieten, ook zijn er sterke aanwijzingen dat vanaf die tijd de ijsmassa op Groenland versneld afnam. Tegelijkertijd is bekend dat de zeespiegel rond die tijd lager was dan normaal door uitbarsting van de Pinatubo en daaruitvolgende mondiale afkoeling ([Nerem et al. 2018](#)). De knik in 1993 kan gedeeltelijk verklaard worden door deze vertraagde zeespiegelstijging. We constateren nu echter dat deze vertraging in zeespiegelstijging is ingehaald, en dat de versnelde stijging nu ook aan de Nederlandse kust waarneembaar is geworden.



Figuur 3.3 Het geschatte aandeel van het nodale getij op de zeespiegel voor de 5 hoofdstations gemiddeld.



Figuur 3.4 De gemiddelde gemeten zeespiegel voor de vijf hoofdstations (zwart), de geschatte (predictie) zeespiegel (gebroken lineaire model) waarbij gecorrigeerd is voor de variatie in opzet (predictie - opzetanomalie), en de geschatte zeespiegel waarbij de windopzet is afgetrokken (predictie - opzet). Windopzet is berekend met het GTSM model (zie paragraaf 2.7).

### 3.3 Nodaal getij

Het nodaal getij draagt bij aan het zeespiegelsignaal met plus of min 1.2 cm (figuur 3.3). Het nodaal getij wordt meegenomen in de regressie, en de invloed daarvan op de zeespiegel wordt dus geschat uit de gegevens in combinatie met het gebruikte model en na aftrek van windopzet. Voor de 5 stations gemiddeld is de bijdrage van het nodaal getij niet afhankelijk van de gebruikte windopzetcorrectie (GTSM of NCEP1) en model (lineair of gebroken lineair). Voor de overige varianten wordt verwezen naar Appendix I.

### 3.4 Windopzet

De zeespiegel aan de Nederlandse kust is door windopzet gemiddeld over de meetperiode zo'n 4.5 cm hoger dan het geval zou zijn zonder windopzet (figuur 3.4). De bijdrage van de windopzet varieert over de jaren.

### 3.5 Stijgt de zeespiegel versneld?

Of er een versnelling is stellen we vast door de modellen met versnelling (met acceleratieterm en met knik en de combinatie daarvan) te vergelijken met het model zonder versnelling. Deze analyse is uitgevoerd voor het gemiddelde van alle hoofdstations minus Delfzijl. De reden hiervan is beschreven in paragraaf 2.3.

De versnellingsmodellen “gebroken lineair” en “gebroken kwadratisch” verklaren beide beter de zeespiegel dan het lineaire model. Echter, het “gebroken lineair” model is het enige model dat significant beter is dan het lineaire model.

We lopen voor de volledigheid alle drie versnellingsmodellen af (figuur 3.5):

Het lineaire model laat een trend zien van  $1.9 \pm 0.1$  mm/jaar.

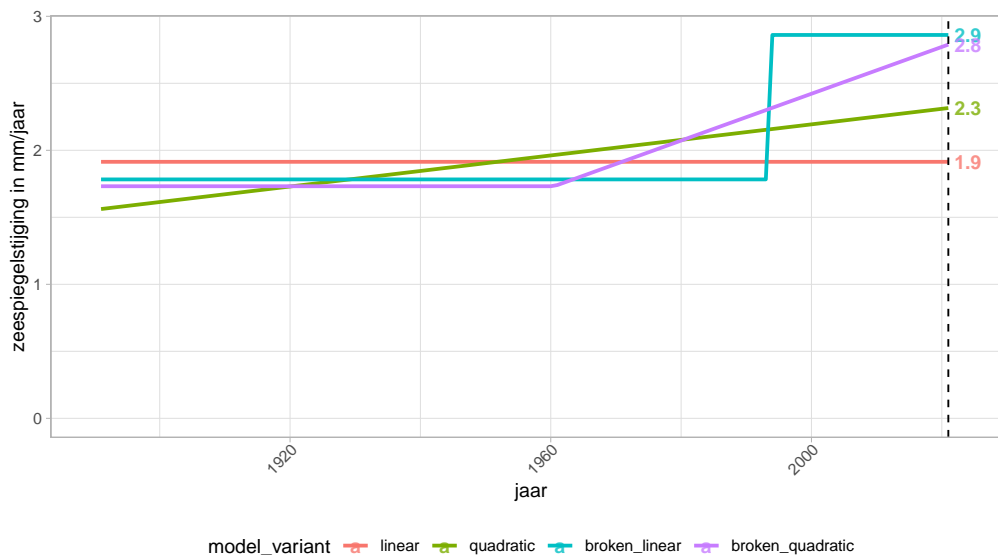
Het model met een acceleratie term (kwadratisch) laat een versnelde zeespiegel zien ( $0.003 \pm 0.002$  mm/jaar<sup>2</sup>). Dit model is niet significant beter dan het lineaire model.

Het model met een acceleratie vanaf 1960 (gebroken kwadratisch) laat een versnelde zeespiegel zien ( $0.009 \pm 0.004$  mm/jaar<sup>2</sup>) vanaf 1960. De trend over de periode voor 1960 is  $1.7 \pm 0.1$  mm/jaar. Dit model is iets minder goed dan het gebroken lineaire model en is ook niet significant beter dan het lineaire model.

De voorkeursvariant, Het model met een knik in 1993 (gebroken lineair) laat een hogere zeespiegelstijging zien ( $2.9 \pm 0.4$  mm/jaar) na 1993 dan ervoor ( $1.8 \pm 0.1$  mm/jaar), een extra  $1.1 \pm 0.3$  mm/jaar.

### 3.6 Verwachting voor komende jaren

We zien dat een constante zeespiegelstijging niet meer de beste beschrijving oplevert voor de metingen tot nu toe. Wat betekent dit voor de komende jaren? Allereerst, onze analyse kan alleen worden toegepast op historische gegevens en is niet direct geschikt voor uitspraken over de komende jaren. In de vorige Zeespiegelmonitor, het advies van [Expertisenetwerk Waterveiligheid \(ENW\)](#) volgend, was het uitgangspunt dat de huidige zeespiegelstijging hooguit voor een periode van 15 jaar vooruit kan worden gebruikt. Uitgaande van het nu beste model is de huidige zeespiegelstijging  $2.9 \pm 0.4$  mm/jaar. De huidige zeespiegelstijging is afhankelijk van het gebruikte model zoals te zien is in figuur 3.5. Hier is duidelijk het verschil te zien in zeespiegelstijging voor het gebroken lineaire model voor en na 1993. Het gebroken kwadratische model, dat de variatie wel goed verklaart maar niet significant beter was dan het lineaire model, laat ongeveer dezelfde zeespiegelstijging zien als het gebroken lineaire model. De zeespiegelstijging in het gebroken lineaire model is over de periode sinds 2000 gelijk, terwijl die van het gebroken kwadratische model in die periode toenam.



Figuur 3.5 Het verloop van de snelheid van zeespiegelstijging in de tijd voor de vier verschillende geteste modellen.

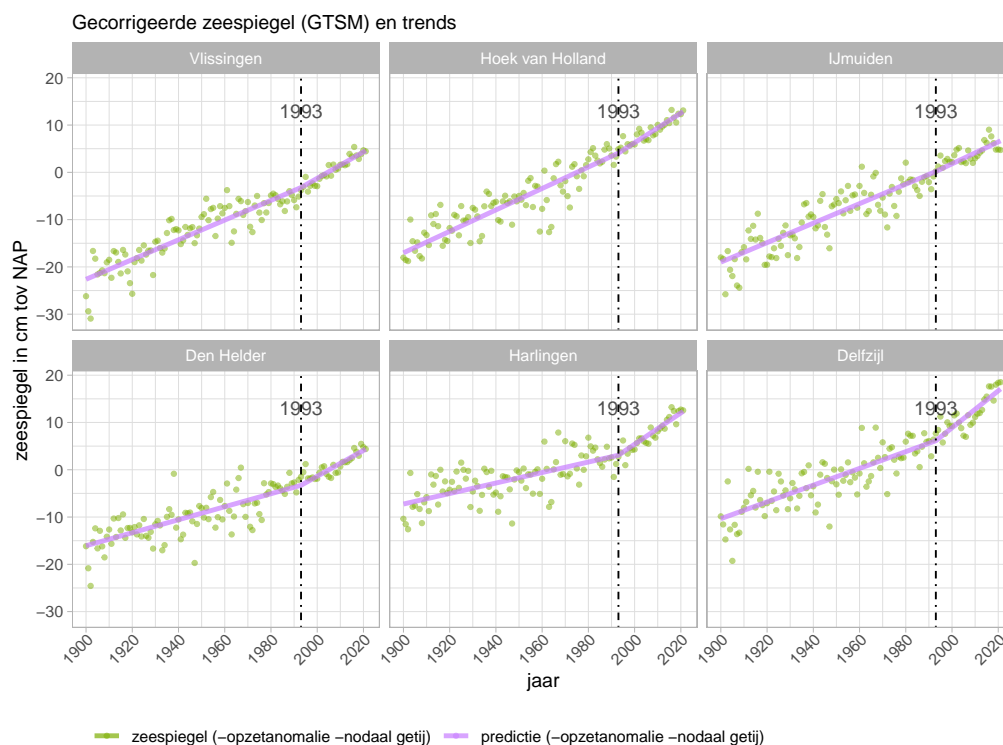
### 3.7 Per station

Figuur 3.6 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 Vlissingen.

Wat verder opvalt is dat de stations in het Waddengebied (Delfzijl, Harlingen, en in mindere mate Den Helder) een groter verschil zien in stijging voor en na 1993 dan de andere stations, dit is af te leiden uit een vergelijking hiervoor tussen het gebroken lineaire model met en het lineaire model (figuur 3.7). Er is een tragere stijging voor 1993, en een snellere stijging na 1993 bij deze stations. De extra versnelling bij Delfzijl kan deels verklaard worden doordat hier de verticale correcties iets achterlopen (paragraaf 2.3).

Dit is ook terug te zien in de waarden van de geschatte parameters (tabel 3.2). De Noordelijke stations laten bij het gebroken lineaire model een relatief groot verschil zien tussen de trend voor en na 1993.

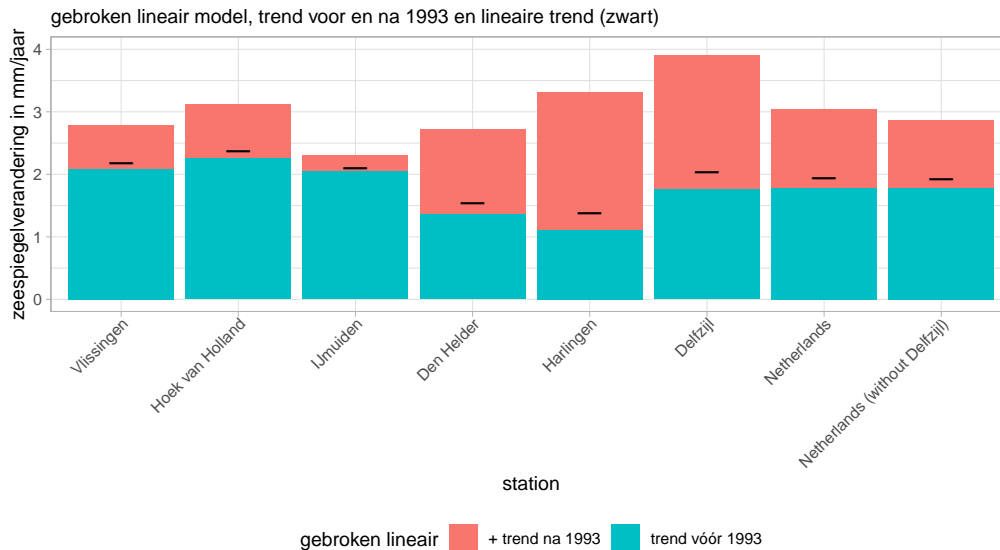
Er zijn verschillende oorzaken die deze verschillen tussen de stations kunnen verklaren. De beschouwing van deze oorzaken is te vinden in paragraaf 4.3.



Figuur 3.6 Zeespiegel en predictie volgens het gebroken lineaire model waarbij gecorrigeerd is voor windopzet (GTSM) en nodaal getij. De trend is voor de 6 getijdstations afzonderlijk weergegeven. De zeespiegel is uitgedrukt ten opzichte van post-2005 NAP. In de periode voor 1979 is gecorrigeerd voor een gemiddelde windopzet.

Tabel 3.2 Constante (als zeespiegel in 1970), trends en standaardfouten voor de 6 hoofdstations apart, berekend voor het gebroken lineaire model.

name	zeespiegel (1970)	trend voor 1993	se	trend na 1993	se2
Vlissingen	-80.1	2.1	0.1	2.8	0.5
Hoek van Holland	-11.4	2.3	0.1	3.1	0.5
Den Helder	-64.5	1.4	0.1	2.7	0.4
Delfzijl	20.6	1.8	0.1	3.9	0.5
Harlingen	5.2	1.1	0.1	3.3	0.4
IJmuiden	-45.6	2.1	0.2	2.3	0.6
Netherlands	-29.3	1.8	0.1	3.0	0.4
Netherlands (without Delfzijl)	-39.3	1.8	0.1	2.9	0.4



Figuur 3.7 Zeespiegel trends voor en na 1993 (gebroken lineaire model) per station, in vergelijking met de trend bij gebruik van het lineaire model (zwarte horizontale strepen).

### 3.8 Bodemdaling of zeespiegelstijging?

Op basis van de analyse in paragraaf F.4.6 en paragraaf H.2.1 kwamen we tot de conclusie dat in alle stations de zeespiegelstijging deels bestaat uit de isostatische en tektonische bodemdalingscomponenten (geologische bodemdaling). Er zijn twee stations waar ook bodemdaling door gaswinning heeft plaatsgevonden, namelijk Delfzijl en Hoek van Holland. Voor Hoek van Holland gaan we er vanuit dat de daling door winning in het zeespiegelsignaal zit. Voor Delfzijl weten we vrij zeker dat de bodemdaling sinds 1973 niet in de zeespiegeldata zit (de Jong 1973 punt 5). Met andere woorden, de relatieve zeespiegelstijging bij Delfzijl gaat eigenlijk sneller dan de zeespiegeldata laat zien, omdat de daling door winning niet meegenomen wordt. Tussen de start van de gaswinning in Groningen in 1963 en 1973 daalde de bodem bij Delfzijl ongeveer 7 cm. Wij gaan er hier vanuit dat deze daling op dezelfde manier is behandeld als de daling na 1973, conform (de Jong 1973 punt 5), en dus niet in het zeespiegelsignaal zit. Daarmee komen we tot de uitsplitsing tussen de verschillende absolute bodemdaling- en zeespiegelcomponenten per station, zoals weergegeven in tabel 3.3.

Tabel 3.3 Uitsplitsing bodemdaling en zeespiegelstijging per station (bodemdaling uit M. P. Hijma and Kooi 2018). Tectoniek + isostasie, Woningen en Bodemdaling zijn berekend over de periode 1917-2017. Bodemdaling is voor Delfzijl exclusief winning voor Hoek van Holland inclusief (zie tekst). Gemiddelde relatieve zeespiegelstijging is gemeten over de periode 1993-2021 (gebroken lineair model).

Station	Tectoniek + Isostasie	Woningen	Bodem	Huidig relatief	Huidig absoluut
	cm	cm	mm/jaar	mm/jaar	mm/jaar
Vlissingen	-2.4	0.0	-0.24	2.8	2.6
Hoek van Holland	-3.7	-1	-0.47	3.1	2.6
IJmuiden	-5.0	0.0	-0.50	2.3	1.8
Den Helder	-5.4	0	-0.54	2.7	2.2

Tabel 3.3 Uitsplitsing bodemdaling en zeespiegelstijging per station (bodemdaling uit M. P. Hijma and Kooi 2018). Tectoniek + isostasie, Winningen en Bodemdaling zijn berekend over de periode 1917-2017. Bodemdaling is voor Delfzijl exclusief winning voor Hoek van Holland inclusief (zie tekst). Gemiddelde relatieve zeespiegelstijging is gemeten over de periode 1993-2021 (gebroken lineair model).

Harlingen	-6.0	0	-0.60	3.3	2.7
Delfzijl	-4.8	-24	-0.48	3.9	3.4

De tabel laat zien dat in Delfzijl de bodem tot 2017 met 24 cm is gezakt sinds in 1963 de gaswinning is gestart. Delfzijl ondergaat hiermee al 60 jaar het niveau van het hoogste zeespiegelscenario (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 mogelijk wel verklaren waarom de gemeten zeespiegelstijging daar altijd wat hoger dan gemiddeld is geweest. Gemiddeld over de zes hoofdgetijdenstations is de bijdrage van geologische bodemdaling 0.45 mm/jaar (M. P. Hijma and Kooi 2018; M. P. Hijma 2022).

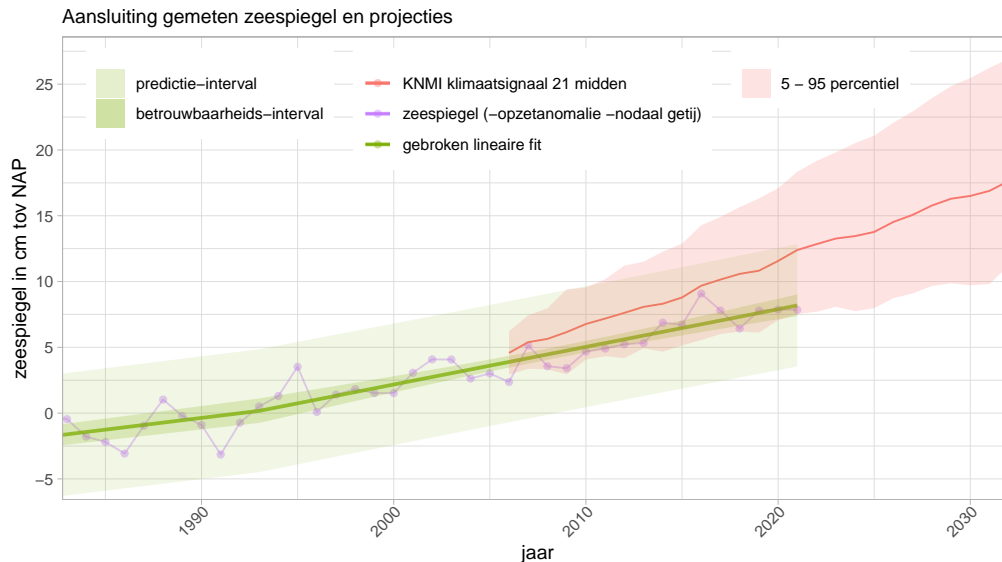
### 3.9 Vergelijking van scenario's versus de huidige zeespiegel

In de vorige zeespiegelmonitor (Fedor Baart et al. 2019) is geconstateerd dat er geen goede aansluiting was tussen metingen en projecties van de zeespiegel. In de tussentijd zijn door Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) nieuwe scenario's berekend (KNMI 2021) die de eerdere projecties (van den Hurk et al. 2014) vervangen. Het zijn representaties van een plausibele toekomstige ontwikkeling, op basis van paden gedefinieerd door Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Stocker, Qin, Plattner, Tignor, Allen, Boschung, Nauels, Xia, Bex, and Midgley 2013). De paden zijn gebaseerd op een mogelijke toekomstige ontwikkeling van emissies 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.

- Referentie-tijdvak - De zeespiegelscenario's zijn relatief ten opzichte van de gemiddelde zeespiegelstand over de periode 1995 tot 2014. De zeespiegel was toen al 3 cm boven NAP, het referentiepunt voor de getijstations. Om de scenario's te vergelijken met de metingen is een correctie uitgevoerd zodat de projecties uitgedrukt worden t.o.v. NAP (>2005). Hiertoe is de gemiddelde gemeten zeespiegel over 1995-2014 opgeteld bij de zeespiegelverandering (t.o.v. die periode) in de projectie.
- Natuurlijke variatie - De zeespiegelscenario's representeren langjarige veranderingen ten opzichte van de referentieperiode. Variaties binnen een klimaatperiode, zoals verschillen van jaar tot jaar door luchtdruk en stormen en getij, zijn niet expliciet weergegeven. De jaargemiddelde zeespiegel varieert met een bandbreedte van ongeveer 5cm rondom de langjarige zeespiegeltrend.
- Marges - De bandbreedte van zeespiegelprojecties neemt toe naar de toekomst. Deze marges omvatten een combinatie van natuurlijke fluctuaties die op klimatologische tijdschalen plaatsvinden (bijvoorbeeld door langzame fluctuaties in oceaanstromingen of lokale warmteopslag) en door modelonzekerheid in de mate van lokale zeespiegelstijging voor een gegeven emissiescenario. Met name deze modelonzekerheid neemt toe met de tijd.





Figuur 3.8 Zeespiegelprojecties (mediaan midden scenario SSP245) met 5 en 95 percentiel uit KNMI klimaatsignaal 2021 (KNMI 2021) gecorrigeerd voor referentieperiode en omgerekend naar NAP vergeleken met metingen gemiddeld over de 5 hoofdstations en gecorrigeerd voor windopzet (GTSM) en getij.

- **Versnelling** - De zeespiegelversnelling in sommige projecties is toe te schrijven is aan processen die in een warmere toekomst een grotere rol kunnen spelen dan nu (zoals grootschalig massaverlies van de grote ijskappen). **Modelkeuze** - In 2021 heeft KNMI in het klimaatsignaal '21 zeespiegelprojecties voor de Nederlandse kust opgenomen. Deze projecties zijn het resultaat van voorlopige selectie en bewerking van beschikbare klimaatprojecties. Bij de publicatie van de officiële klimaatscenario's in 2023 kunnen de daarin opgenomen zeespiegelscenario's afwijken van de resultaten die in 2021 zijn gepubliceerd.

In figuur 3.8 zien we dat de metingen aan de onderkant liggen van de projectie (midden scenario). Hoewel er overlap is van het predictieinterval van de gebroken lineaire fit en de onzekerheid in the projectie (uitgedrukt als 5 en 95 percentiel), valt op dat de huidige stijging van de mediane projectie hoger is dan verwacht op grond van het gebroken lineaire model. Hier is dus een discrepantie. De getoonde scenario's impliceren een relatief steile toename van de snelheid waarmee de zeespiegel in de nabije toekomst stijgt. In het klimaatsignaal '21 (KNMI 2021) is dit verschil verklaard door variatie in natuurlijke processen (weer, oceaanstromingen, regionale opwarming en zoutgehalte van de oceaan).

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**.

### 3.10 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 in de laatste 2 eeuwen (Wahl et al. 2013). In figuur 3.9 zien we dat de stations na 1890 grotendeels vergelijkbare dezelfde variatie trends laten zien. De stations in Noorwegen (Hirshals tot Bergen) komen omhoog, en de relatieve zeespiegelstijging is daar zeer beperkt of zelfs negatief. In de periode voor 1890 ontbraken goede hoogtereferentiestelsels, wat de vergelijkbaarheid van de stations beperkt.

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 figuur 3.9 zien we dat de stations grotendeels dezelfde variatie laten zien. De stations in Noorwegen (Hirshals tot Bergen) 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.

In detail zien we dat vooral Delfzijl en Harlingen de laatste jaren een zeespiegelstijging vertonen die duidelijk boven de getrokken lijn ligt (een lineaire fit met gefit nodaal getij). Dit is de reden dat (gemiddeld over de Nederlandse stations) een gebroken lineair model beter past dan een lineaire stijging. Deze versnelling is te zien bij sommige buitenlandse stations zoals Oostende, Borkum and Esbjerg, maar is lang niet zo duidelijk bij veel andere ons omringende stations.

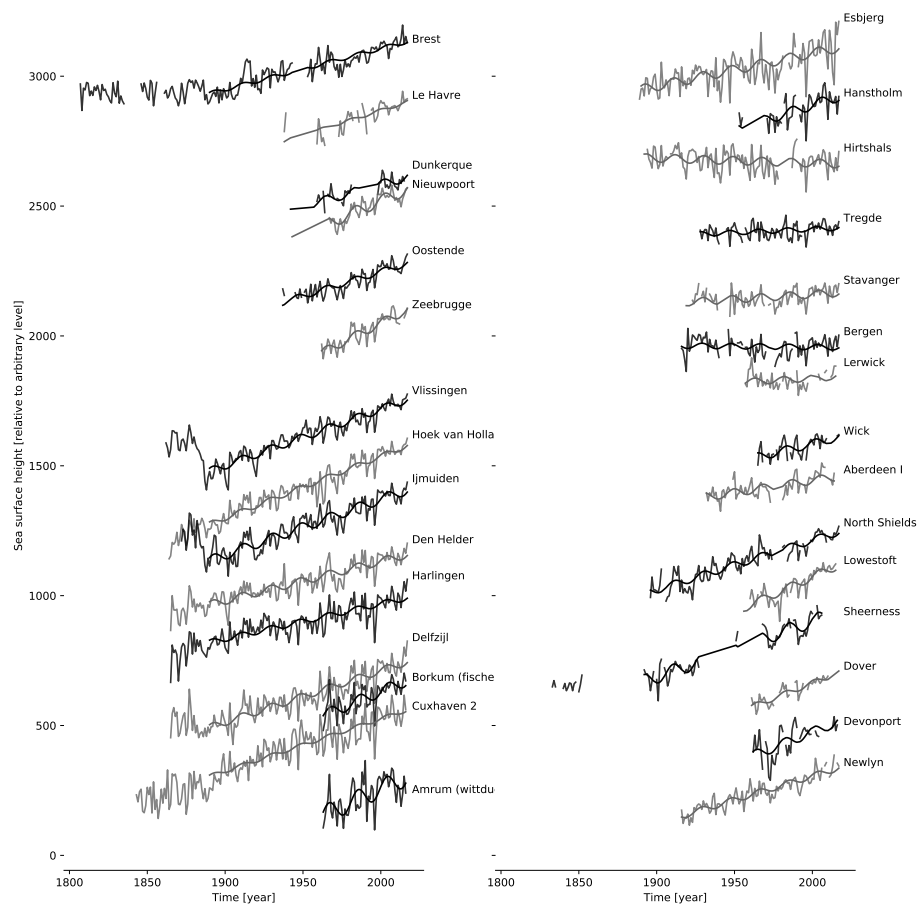
### 3.11 Vergelijking met satellietmetingen

Satellietmetingen zijn gebruikt ter verificatie van de resultaten. In theorie komt de absolute zeespiegelstijging, zoals gemeten met satellieten, in combinatie met bodemdaling overeen met de zeespiegelstand en zeespiegeltrend zoals gemeten met de getijstations.

Voor een nauwkeurige vergelijking is het nodig om de gemeten hoogtes ten opzichte van hetzelfde verticale referentie vlak te bepalen. Satellietgegevens worden berekend ten opzichte van een gemiddeld niveau over een bepaalde periode (anomaliën), zonder informatie over het absolute referentieniveau. Op basis hiervan kunnen we alleen trends met elkaar vergelijken.

Het resultaat hiervan is te zien in 3.10. Deze figuur laat stijgsnelheid zien in een punt voor de kust van Nederland in de Noordzee. Voor het getoonde voorbeeld is de stijgsnelheid uit de satellietwaarnemingen (0.22 cm/jaar) dus lager dan de gemiddelde stijging zoals berekend uit de stations (0.29 cm/jaar). Dit is ook verwacht, omdat bij de (relatieve) zeespiegelstijging berekend uit de stationmetingen (t.o.v. NAP) de bodemdaling opgeteld is. Deze is eerder geschat als ongeveer 0.45 mm/jaar of 0.045 cm/jaar (tabel 3.3). We kunnen concluderen dat beide waarnemingen vrijwel overeenkomen.

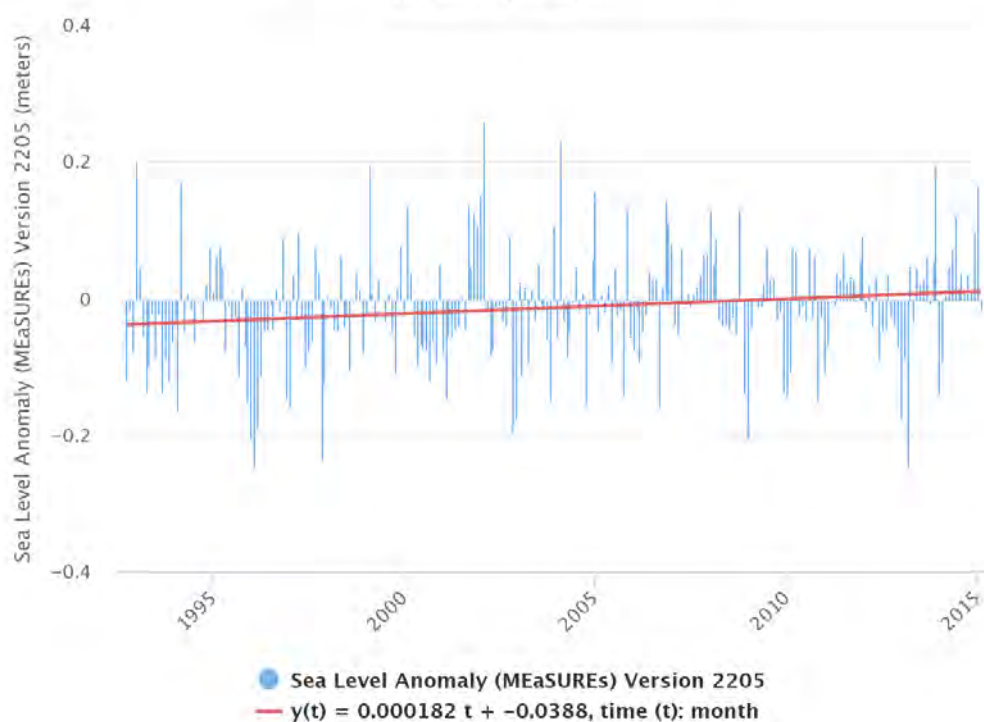
Door het ontbreken van een absolute aansluiting aan het begin van de meting, de korte periode waarvoor de gegevens beschikbaar zijn, de beperkte kwaliteit bij de kust, de hogere meetfout en lagere meetfrequentie maken de satellietgegevens een minder geschikte bron om de huidige zeespiegelstijging uit af te leiden. De ruimtelijke dekking maakt de gegevens geschikt om ruimtelijke variatie in de Noordzee te onderzoeken.



Figuur 3.9 Zeespiegelmetingen van diverse stations in Frankrijk, België, Denemarken, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk.

## Sea Level Anomaly (MEaSURES) Version 2205

Source: TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3  
52.0000N, 4.0000E – 53.0000N, 5.0000E  
Oct 1992 – Jan 2015



Figuur 3.10 Gemiddelde snelheid van de zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust op basis van satellietmetingen. De snelheid is berekend door een lineair model over de periode 1993 - heden. De berekening is gedaan met deze [NASA webtool](#). De berekende zeespiegelstijging over de periode 1993 - 2015 is  $0.000182 * 12 \text{ maanden} * 100 \text{ cm} = 0.22 \text{ cm/jaar}$

### 3.12 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 (ongelijke verdeling van varianties) heeft geen effect op de schattingen van de huidige zeespiegel, alleen op de standaardfouten.

## 4 Discussie

In de voorgaande hoofdstukken hebben we de methodiek besproken en vastgelegd, en resultaten gepresenteerd voor de huidige zeespiegel- en zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. In deze context is er nog een aantal punten die relevant zijn om te bespreken.

### 4.1 Toepassingsbereik van de gebruikte methode

Is de gebruikte methode doelmatig voor het beoogde gebruik? Hiervoor is het nodig om de methode op te splitsen in de verschillende onderdelen.

Er is gekozen voor de hoofdstations langs de Nederlandse kust, omdat deze het beste de relatieve zeespiegel aangeven voor onze kust. Satellietgegevens hebben een grotere ruimtelijke dekking, maar zijn niet gedetailleerd genoeg in de kustzone (zie bijlage H.3). Van het hoofdstation Delfzijl is gebleken dat er een achterstand is in de verticale correcties t.o.v. NAP. Daarom is dit station niet meegenomen in de hoofdresultaten (hoofdstuk 3).

Wind(storm)opzet en -afzet is een belangrijke bron van variatie voor de jaarlijkse zeespiegel aan de Nederlandse kust (Fedor Baart et al. 2014; Gerkema and Duran-matute 2017). Resultaten van het GTSM model zijn gebruikt om hiervoor te corrigeren. In vorige versies van de Zeespiegelmonitor werd hiervoor een correlatieve methode gebruikt waarbij een windheranalyse (NCEP1) meegenomen werd in het regressiemodel. Het nadeel hiervan is dat de trend in zeespiegel tegelijk met een eventuele trend in wind wordt geschat. Daarom is dit jaar gekozen voor een additieve correctie met windopzet berekend met het GTSM model. GTSM is zeer geschikt om het effect van wind op de zeespiegel te schatten in de periode van 1979 tot nu. Vooral voor de schatting van windafzet (bij oostelijke wind) presteert GTSM beter dan de wind heranalyses. Voor eerdere jaren kan het effect van wind geschat worden met een correlatieve methode (paragraaf 2.7). We bevelen aan om het GTSM model zo snel mogelijk uit te breiden naar de periode van 1950 - nu voor een nauwkeuriger schatting van zeespiegeltrends.

Volgens de criteria die we hanteren voor modelkeuze (AIC) is een keuze gemaakt voor het gebroken lineaire model met een knikpunt in 1993. Dit is het meest geschikte model voor schatting van de huidige zeespiegel, en de zeespiegelstijging over de afgelopen periode. De methode is geschikt om over relatief korte tijd een verandering van zeespiegelstijging te detecteren (gegeven het feit dat we een knik veronderstellen is dit een beter model dan het lineaire). De gebruikte methodiek zegt echter niet veel over de oorzaak van deze verandering.

Voor kustonderhoud via zandsuppletie is de huidige methode geschikt. Zandsuppletie is een reactief proces, bedoeld om het volume zand dat nodig is om het kustfundament mee te laten groeien met de zeespiegel aan te vullen. Hiervoor is een zo betrouwbaar mogelijke schatting van de zeespiegelstijging over de afgelopen jaren nodig. De methode die gebruikt wordt voor het presenteren van de resultaten in hoofdstuk 3 voldoet daaraan.

De zeespiegelmonitor is niet bedoeld om de verwachte zeespiegelstand in 2050 of 2100 te bepalen. Tegelijkertijd zien we dat zeespiegelscenario's niet bedoeld zijn om

op korte termijn de zeespiegel te voorspellen. Voor de planning van zandsuppletie op middellange termijn (10-15 jaar vooruit) is het nodig om een zo nauwkeurig mogelijke schatting te maken van de zeespiegelstijging over die periode. Hiervoor is binnen de zeespiegelmonitor geen methodiek vastgelegd. Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wordt gewerkt aan een signaleringsmethodiek. Een mogelijk onderdeel daarvan zou de ontwikkeling van een methodiek voor de voorspelling van de zeespiegel op de korte termijn kunnen zijn. Totdat een betere methode beschikbaar is, kiezen we een periode van tot 15 jaar vooruit, als de periode waarvoor we het gebruik van de huidige zeespiegel en -stijging 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.

De verschillende indicatoren gerelateerd aan zeespiegel en/of getij (kenmerkende waarden) voor de Nederlandse kust en gebruikte methodiek, voor zover bekend, is binnen de zeespiegelmonitor op een rijtje gezet in Nicolai and Verkaik (2020).

## 4.2 Waarom nu een versnelling

De zeespiegel aan de Nederlandse kust stijgt, en stijgt versneld, blijkt uit de resultaten. We concluderen dit uit het feit dat het gebroken lineaire model significant beter is dan het tot nu toe gebruikte lineaire model, ook als rekening gehouden wordt met het verschil in vrijheidsgraden. Dit is het eerste jaar dat dit binnen de Zeespiegelmonitor geconstateerd wordt, voorheen was er geen reden om het lineair stijgende model te verwerpen. Hiervoor zijn twee oorzaken aan te wijzen:

1. Er zijn metingen bijgekomen over de laatste jaren. Deze metingen liggen, na correctie voor wind en getij, zo hoog dat we moeten vaststellen dat er nu sprake is van een trendbreuk. Deze trendbreuk constateerden we al eerder maar was toen niet significant.
2. We zijn overgegaan op een windopzetcorrectie met het **GTSM** model. Het voordeel hiervan is dat de correctie onafhankelijk geschat wordt. Het **GTSM** model beschrijft ook beter de windopzet voor situaties met oostenwind dan de hiervoor gebruikte methode. Het nadeel is dat het **GTSM** model op dit moment voor een kortere periode beschikbaar is. Vóór 1979 nemen we aan dat de windopzet gemiddeld was.

Een versnelde zeespiegel aan de Nederlandse kust is met andere methodieken aangetoond door Steffelbauer et al. (2022) en Keizer et al. (2022).

Steffelbauer et al. (2022) onderzocht met een soortgelijke methodiek als de Zeespiegelmonitor of er een significant gezamenlijk knikpunt was in de tijdreeks van waterhoogte van de Nederlandse hoofdstations. Er is een grotere subset van stations gebruikt (Maassluis en Terschelling zijn ook meegenomen) inclusief Delfzijl. Ook is het knikpunt bepaald aan de afzonderlijke stations (maar wel gezamenlijk), en niet aan het gemiddelde zoals in de Zeespiegelmonitor. Geconstateerd werd dat er een gezamenlijk knikpunt was in 1993. Deze constatering vinden we nu ook in de Zeespiegelmonitor. Gemiddeld over de stations werd door Steffelbauer et al. (2022) een zeespiegelstijging gevonden van  $2.7 \pm 0.4$  mm/jaar voor de periode na 1993.

Keizer et al. (2022) onderzocht de trend in zeespiegelstijging over een lange termijn met een geavanceerd statistische methode. Voor correctie door windopzet is de **20CR**

heranalyse gebruikt. Na een correctie van de zeespiegel voor de lange termijn windveranderingen is de zeespiegelstijging en het verschil daarin over tijd geschat met behulp van [Generalized Additive Model \(GAM\)](#). Er is ook rekening gehouden met seizoensvariatie in windopzet. De conclusie is dat de zeespiegelstijging in de periode 2000-2019 (3.0[2.4 - 3.5] mm/jaar) significant hoger is dan in de periode 1940-1959 (1.5[1.1 - 1.8] mm/jaar).

De huidige stijging in de zeespiegelmonitor ( $2.9 \pm 0.4$  mm/jaar) is dus consistent met de hierboven genoemde studies.

In de Zeespiegelmonitor werd windopzet tot vorig jaar geschat door een wind-heranalyse (NCEP) als covariabele mee te nemen in het verklaren van de trend. Dit was nodig, omdat op voorhand niet het exacte effect van wind op de windopzet bekend is. Dit jaar is deze analyse uitgevoerd met NCEP en 20CR heranalyses en een combinatie van deze twee. Tevens is een analyse toegevoegd waarbij met windopzet uit het GTSM model direct is gebruikt als correctievariabele. Hierbij is de mate van windopzet onafhankelijk geschat van de trendbepalingsmethode. We concluderen dat deze laatste methodiek beter geschikt is voor correctie van landelijke opzet, het nadeel is dat het GTSM model voor een kortere periode (1979 - nu) beschikbaar is dan de wind heranalyses. We bevelen daarom aan om het GTSM model uit te breiden naar jaren voor 1979. Het GTSM model is een mondiaal dekkend model. Het verdient aanbeveling om de geschiktheid van deze manier van opzet berekenen voor de individuele stations te bepalen.

Sommerend komen we op de volgende balans van de wereldwijde versus de Nederlandse zeespiegelstijging over de periode 1993-2021. De zeespiegelstijging over deze periode is in Nederland hoger dan over de periode voor 1993, zoals besproken in paragraaf 3.5. 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 en omdat we op een gunstige plek liggen wat betreft de bijdrage van Groenlands massaverlies aan de zeespiegelstijging (9cm) zien we aan de kust van Nederland toch een lagere zeespiegelstijging dan globaal. Andere effecten, zoals veranderingen in dichtheid, zijn hier buiten beschouwing gelaten.

### 4.3 Verschillen binnen Nederland

Zowel de zeespiegelstand (hoe hoog ligt de lijn) als de zeespiegelstijging (hoe steil is de lijn) variëren langs de Nederlandse kust. De hogere huidige stijging van de stations in of naast de Waddenzee (Harlingen en Den Helder) vergeleken met de andere stations en het grotere verschil in stijging voor en na 1993

Daarvoor zijn verschillende mogelijke oorzaken. In ([Fedor Baart et al. 2019](#)) worden verschillen in bodemdaling

- Bodemdaling - Het ten opzichte van elkaar verzakken van de nulpalen (paragraaf 3.8) Absolute zeespiegel - De absolute zeespiegelstijging is niet uniform verdeeld door bijvoorbeeld dichtheidsvariaties, stromingvariaties, gravitatieeffect en interacties tussen bijvoorbeeld zeespiegelstijging en getij (paragraaf 3.11)
- Meettechnieken - er kunnen verschillen zijn in de manier van meten (hoofdstuk H)
- Overige - daarnaast kunnen lokale ingrepen en onbekende oorzaken veranderingen veroorzaken (paragraaf 4.3)

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 paragraaf 3.8. 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 paragraaf H.2.1. In de metingen met satellieten zien we dezelfde langsvariatie van de zeespiegel als die we langs de kust meten. Dezelfde orde van grootte 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 (figuur F.6).

De belangrijkste conclusie is dat de zeespiegel langs de Nederlandse kust niet uniform is. Een uitgewerkt voorbeeld van hoe verschillen in luchtdruk en temperatuur resulteerden in grote zeespiegelvariatiën 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 lastig, maar het is wel duidelijk dat hydrodynamische en morfologische effecten van grote ingrepen lang kunnen aanhouden [Maren2023]. 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 zeespiegelvariatiën. De verschillen in absolute waarden kunnen veroorzaakt zijn door de methodiek van de nulpalen en de vaststelling van het NAP. Nu alle stations uitgerust zijn met GNSS-ontvangers komt hier op niet al te lange termijn uitsluitel over.

## 5 Referenties

- Abidin, Hasanuddin Z., Heri Andreas, Irwan Gumilar, Yoichi Fukuda, Yusuf E. Pohan, and T. Deguchi. 2011. "Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and Its Relation with Urban Development." *Natural Hazards* 59 (3): 1753.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>.
- Author, Unknown. 1954. "Nederlandse Dijken Zijn Meters Gezakt." *De Waarheid* 13 (1477). <https://resolver.kb.nl/resolve?urn=ddd:010369213:mpeg21:a0064>.
- . 2010. "Correctie Formulering over Overstromingsrisico Nederland in IPCC-Rapport." <http://www.pbl.nl/dossiers/klimaatverandering/content/correctie-formulering-over-overstromingsrisico>.
- . 2012. "Modelkeur 2012." Unie van Waterschappen.
- . 2022. "Sea Level: Frequently Asked Questions and Answers." Website.  
[https://www.psm.nl/train/\\_and/\\_info/faqs/](https://www.psm.nl/train/_and/_info/faqs/).
- Baart, Fedor. 2016. "Reproduceerbaarheid zeespiegelmetingen." Delft: Deltares.  
<https://pub.kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000020846>.
- Baart, Fedor, and Gennadii Donchyts. 2020. "Visualizing changes of the Antarctic Ice Sheet." Delft: Deltares.  
<https://pub.kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000020844>.
- Baart, Fedor, Mark Van Koningsveld, M. J. F. Stive, and Mark van Koningsveld. 2012. "Trends in Sea-Level Trend Analysis." *Journal of Coastal Research* 280 (2): 311–15. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-11A-00024.1>.
- Baart, Fedor, Dewi Le Bars, and Bart J. J. M. van den Hurk. 2021. "Methode voor visualisatie van tijdreeksen en scenario's voor zeespiegelstijging – concept versie voor discussie." Deltares, KNMI.  
<https://kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000020941>.
- Baart, Fedor, Robert Leander, John de Ronde, Hylke de Vries, Vincent Vuik, and Robin Nicolai. 2014. "Zeespiegelmonitor 2014." 1209426.202. Delft: Deltares.
- Baart, Fedor, Guus Rongen, Marc Hijma, Henk Kooi, Renske De Winter, and Robin Nicolai. 2019. "Zeespiegelmonitor 2018, De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust." Delft: Deltares.  
<https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/Zeespiegelmonitor-2018-final.pdf>.
- Baart, Fedor, Pieter H. A. J. M. van Gelder, John de Ronde, Mark van Koningsveld, and Bert Wouters. 2012. "The Effect of the 18.6-Year Lunar Nodal Cycle on Regional Sea-Level Rise Estimates." *Journal of Coastal Research* 28 (2): 511–16.  
<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00169.1>.
- 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*, 222–29. San Diego, United States of America.
- Baart, F., R. Leander, J. G. de Ronde, H. de Vries, V. Vuik, and R. Nicolai. 2015. "Zeespiegelmonitor 2014." 1209426.202. Deltares, HKV en KNMI.
- Begum, Selina, Marcel JF Stive, and Jim W Hall. 2007. *Flood Risk Management in Europe: Innovation in Policy and Practice*. Vol. 25. Springer Science; Business Media.
- 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): 1423–30.  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt481>.
- Brand, GBM, G van Brussel, JH 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*.

- Buisman, J, and A. F. V. van Engelen. 2006. *Duizend Jaar Weer, Wind En Water in de Lage Landen. Dl. 5. 1675-1750*. Franeker: Van Wijnen.
- Cáceres, D, B Marzeion, J H Malles, B D Gutknecht, H Müller Schmied, and P Döll. 2020. "Assessing global water mass transfers from continents to oceans over the period 1948–2016." *Hydrology and Earth System Sciences* 24 (10): 4831–51. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4831-2020>.
- Caldwell, Douglas R. 1978. "The Maximum Density Points of Pure and Saline Water." *Deep Sea Research* 25 (2): 175–81. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0146-6291\(78\)90005-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0146-6291(78)90005-X).
- Camuffo, Dario, Chiara Bertolin, and Patrizia Schenal. 2017. "A Novel Proxy and the Sea Level Rise in Venice, Italy, from 1350 to 2014." *Climatic Change* 143 (1): 73–86. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1991-3>.
- Cazenave, Anny, Benoit Meyssignac, Michael Ablain, Magdalena Balmaseda, Jonathan Bamber, Valentina Barletta, Brian Beckley, et al. 2018. "Global Sea-Level Budget 1993-Present." *Earth System Science Data* 10 (3): 1551–90.
- Cazenave, Anny, and Lorena Moreira. 2022. "Contemporary Sea-Level Changes from Global to Local Scales: A Review." *Proceedings of the Royal Society A* 478 (2261): 20220049.
- Chambers, Don P., Anny Cazenave, Nicolas Champollion, Habib Dieng, William Llovel, Rene Forsberg, Karina von Schuckmann, and Yoshihide Wada. 2017. "Evaluation of the Global Mean Sea Level Budget Between 1993 and 2014." *Surveys in Geophysics* 38 (1): 309–27. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9381-3>.
- Chen, Jianli, James S. Famiglietti, Bridget R. Scanlon, and Matthew Rodell. 2016. "Groundwater Storage Changes: Present Status from GRACE Observations." In *Remote Sensing and Water Resources*, edited by A. Cazenave, N. Champollion, J. Benveniste, and J. Chen, 207–27. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4%7B/\\_%7D9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32449-4%7B/_%7D9).
- Cherniawsky, Josef Y., Michael G. G. Foreman, Sok Kuh Kang, Remko Scharroo, and A. Jane Eert. 2010. "18.6-Year Lunar Nodal Tides from Altimeter Data." *Continental Shelf Research* 30 (6): 575–87. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.10.002>.
- Church, John A., and Neil J. White. 2011. "Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century." *Surveys in Geophysics* 32: 585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.
- Ciraci, E., I. Velicogna, and S. Swenson. 2020. "Continuity of the Mass Loss of the World's Glaciers and Ice Caps From the GRACE and GRACE Follow-On Missions." *Geophysical Research Letters* 47 (9): 1–11. <https://doi.org/10.1029/2019GL086926>.
- Cleveland, William S. 1979. "Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots." *Journal of the American Statistical Association* 74 (368): pp. 829–836. <http://www.jstor.org/stable/2286407>.
- Cleveland, William S, and Clive Loader. 1996. "Smoothing by Local Regression: Principles and Methods." In *Statistical Theory and Computational Aspects of Smoothing*, edited by Wolfgang Härdle and Michael G Schimek, 10–49. Heidelberg: Physica-Verlag HD.
- de Boer, GJ. 2009. "On the Interaction Between Tides and Stratification in the Rhine Region of Freshwater Influence." PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology.
- de Bruijne, Arnoud, and Nederlandse Commissie 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.
- de Jong, H. 1973. "Bodemdaling Veroorzaakt Door Aardgaswinningen in de Provincie Groningen." Rijkswaterstaat.
- de Ronde, J. G., F. Baart, C. A. Katsman, and V. Vuik. 2014. "Zeespiegelmonitor."

- 1208712–000. Deltares, HKV en KNMI.
- Deltacommissie. 1960. *Rapport Deltacommissie. Dl. 1. Eindverslag En Interimadviezen*. 's-Gravenhage: Staatsdrukkerij- en Uitgeverijbedrijf. <http://repository.tudelft.nl/file/1219694/382018>.
- . 2008. *Samen Werken Met Water: Een Land Dat Leeft, Bouwt Aan Zijn Toekomst; Bevindingen van de Deltacommissie 2008*. S.l: S.n. <http://www.deltacommissie.com/doc/2008-09-03//%20Advies//%20Deltacommissie.pdf>.
- Deschamps, Pierre, Nicolas Durand, Edouard Bard, Bruno Hamelin, Gilbert Camoin, Alexander L Thomas, Gideon M Henderson, Jun'ichi Okuno, and Yusuke Yokoyama. 2012. "Ice-Sheet Collapse and Sea-Level Rise at the boiling Warming 14,600 Years Ago." *Nature* 483 (7391): 559.
- Dickman, SR. 1988. "Theoretical Investigation of the Oceanic Inverted Barometer Response." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93 (B12): 14941–46.
- Dillingh, D. 2013. "Kenmerkende Waarden Kustwateren En Grote Rivieren." 1207509-000. Deltares.
- Dillingh, D, F Baart, and J de Ronde. 2010. "Definitie Zeespiegelstijging Voor Bepaling Suppletiebehoefte." 1201993–002. Deltares.
- Dillingh, Douwe, Fedor Baart, and John de Ronde. 2012. "Is er al versnelde zeespiegelstijging?" *H 2 O* 45 (14): 37.
- Domingues, Ricardo, Gustavo Goni, Molly Baringer, and Denis 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. <https://doi.org/10.1029/2018GL081183>.
- Donchyts, Gennadii, Fedor Baart, Hessel Winsemius, Noel Gorelick, Jaap Kwadijk, and Nick van de Giesen. 2016. "Earth's Surface Water Change over the Past 30 Years." *Nature Climate Change* 6 (August): 810 EP–. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3111>.
- 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). <https://doi.org/10.1126/science.aaa4019>.
- Eilers, Paul HC. 2003. "A Perfect Smoother." *Analytical Chemistry* 75 (14): 3631–36.
- Emeis, Kay-Christian, Justus van Beusekom, Ulrich Callies, Ralf Ebinghaus, Andreas Kannen, Gerd Kraus, Ingrid Kröncke, et al. 2015. "The North Sea — a Shelf Sea in the Anthropocene." *Journal of Marine Systems* 141: 18–33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.03.012>.
- Ericson, Jason P., Charles J. Vörösmarty, S. Lawrence Dingman, Larry G. Ward, and Michel Meybeck. 2006. "Effective Sea-Level Rise and Deltas: Causes of Change and Human Dimension Implications." *Global and Planetary Change* 50 (1): 63–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.07.004>.
- Frederikse, Thomas, Riccardo Riva, Cornelis Slobbe, Taco Broerse, and Martin Verlaan. 2016. "Estimating Decadal Variability in Sea Level from Tide Gauge Records: An Application to the North Sea." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, n/a–. <https://doi.org/10.1002/2015JC011174>.
- Fretwell, P., H. D. Pritchard, D. G. Vaughan, J. L. Bamber, N. E. Barrand, R. Bell, C. Bianchi, et al. 2013. "Bedmap2: Improved Ice Bed, Surface and Thickness Datasets for Antarctica." *The Cryosphere* 7 (1): 375–93. <https://doi.org/10.5194/tc-7-375-2013>.
- Gardner, Alex S., Geir Moholdt, J. Graham Cogley, Bert Wouters, Anthony A. Arendt, John Wahr, Etienne Berthier, et al. 2013. "A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009." *Science* 340 (6134): 852–57. <https://doi.org/10.1126/science.1234532>.
- Gebraad, A W, and M E Philippart. 1998. "The Dutch Continental Shelf Model, DCSM98: Calibration Using Altimeter Data." Werkdocument RIKZ/OS- 98.121x.

RIKZ.

- Gelder, Pieter Van. 2017. "Reproduceerbaarheid van statistische modellen voor zeespiegelprojecties." Delft: TU Delft.
- Gerkema, Theo, and Matias Duran-matute. 2017. "Interannual variability of mean sea level and its sensitivity to wind climate in an inter-tidal basin," 1223–35.
- Gregory, Jonathan M, Stephen M Griffies, Chris W Hughes, Jason A Lowe, John A Church, Ichiro Fukimori, Natalya Gomez, et al. 2019. "Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global." *Surveys in Geophysics* 40 (6): 1251–89. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09525-z>.
- Hansen, Jens Morten, Troels Aagaard, and Antoon 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*, 456–59. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15A-00004.1>.
- Hijma, M. P. 2022. "Bodemdalingsmonitor 2022 - Kustfundament En de Getijdenbekkens - Overzicht Onderzoek 2018-2021." Deltares report 11208035-003-ZKS-0003.
- Hijma, M. P., and H. Kooi. 2018. "Bodemdaling in Het Kustfundament En de Getijdenbekkens." Deltares report 11200538-008-ZKS-0001.
- Hijma, Marc P, and Kim M Cohen. 2019. "Holocene Sea-Level Database for the Rhine-Meuse Delta, the Netherlands: Implications for the Pre-8.2 Ka Sea-Level Jump." *Quaternary Science Reviews* 214: 68–86. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.05.001>.
- Hijma, Marc, and Henk Kooi. 2017. "Bodemdaling in Het Kustfundament En de Getijdenbekkens." 11200538-008. Deltares.
- Hollebrandse, Florenz A. P. 2005. "Temporal Development of the Tidal Range in the Southern North Sea." Master's thesis, Delft University of Technology.
- Honingh, D, J Leenders, and B Strijker. 2021. "Werkwijze inmeten zeespiegelstand hoofdgetijdenstations." Lelystad: HKV.
- Horwath, M, B D Gutknecht, A Cazenave, H K Palanisamy, F Marti, B Marzeion, F Paul, et al. 2022. "Global sea-level budget and ocean-mass budget, with a focus on advanced data products and uncertainty characterisation." *Earth System Science Data* 14 (2): 411–47. <https://doi.org/10.5194/essd-14-411-2022>.
- Hsu, Chia-Wei, and Isabella Velicogna. 2017. "Detection of Sea Level Fingerprints Derived from GRACE Gravity Data." *Geophysical Research Letters* 44 (17): 8953–61. <https://doi.org/10.1002/2017GL074070>.
- Huang, Boyin, Peter W Thorne, Viva F Banzon, Tim Boyer, Gennady Chepurin, Jay H Lawrimore, Matthew J Menne, Thomas M Smith, Russell S Vose, and Huai-Min Zhang. 2017. "Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Intercomparisons." *Journal of Climate* 30 (20): 8179–8205.
- Hugonnet, Romain, Robert McNabb, Etienne Berthier, Brian Menounos, Christopher Nuth, Luc Girod, Daniel Farinotti, et al. 2021. "Accelerated Global Glacier Mass Loss in the Early Twenty-First Century." *Nature* 592 (7856): 726–31.
- IPCC Climate Change. 2013. "The physical science basis." *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 1535: 2013.
- Jayne, Steven R., Dean Roemmich, Nathalie Zilberman, Stephen C. Riser, Kenneth S. Johnson, Gregory C. Johnson, and Stephen R. Piotrowicz. 2017. "The Argo Program: Present and Future." *Oceanography* 30. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2017.213>.
- Jevrejeva, S., J. C. Moore, A. Grinsted, A. P. Matthews, and G. Spada. 2014. "Trends



- and Acceleration in Global and Regional Sea Levels Since 1807." *Global and Planetary Change* 113 (0): 11–22.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.12.004>.
- Kalnay, Eugenia, Masao Kanamitsu, Robert Kistler, William Collins, Dennis Deaven, Lev Gandin, Mark Iredell, et al. 1996. "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project." *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3): 437–72.
- Keizer, I, D Le Bars, C de Valk, A Jüling, R van de Wal, and S Drijfhout. 2022. "The acceleration of sea-level rise along the coast of the Netherlands started in the 1960s." *EGUsphere* 2022: 1–21. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-935>.
- Kemp, Andrew C., Benjamin P. Horton, Jeffrey P. Donnelly, Michael E. Mann, Martin Vermeer, and Stefan Rahmstorf. 2011. "Climate Related Sea-Level Variations over the Past Two Millennia." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (27): 11017–22. <https://doi.org/10.1073/pnas.1015619108>.
- KNMI. 2021. "KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert." De Bilt: KNMI.
- Kopp, Robert E., Frederik J. Simons, Jerry X. Mitrovica, Adam C. Maloof, and Michael Oppenheimer. 2009. "Probabilistic Assessment of Sea Level During the Last Interglacial Stage." *Nature* 462 (December): 863 EP–.  
<http://dx.doi.org/10.1038/nature08686>.
- Kroon, I. C. 2016. "Actualisering Beleidsscenario Zeespiegelstijging Voor Delfstofwinning Onder de Waddenzee." Advies AGE 16-10.066. TNO.
- Lambeck, Kurt, Hélène Rouby, Anthony Purcell, Yiyang Sun, and Malcolm 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): 15296–303. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111>.
- Legg, Stephen. 2021. "IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis." *Interaction* 49 (4): 44–45.
- Libby, W. F. 1946. "Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation." *Phys. Rev.* 69 (June): 671–72.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.69.671.2>.
- 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 (October): 1031 EP–.  
<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2387>.
- McCarthy, Gerard D., Ivan D. Haigh, Joël J. -M. Hirschi, Jeremy P. Grist, and David A. Smeed. 2015. "Ocean Impact on Decadal Atlantic Climate Variability Revealed by Sea-Level Observations." *Nature* 521 (May): 508 EP–.  
<http://dx.doi.org/10.1038/nature14491>.
- McKay, Nicholas P., Jonathan T. Overpeck, and Bette L. Otto-Bliesner. 2011. "The Role of Ocean Thermal Expansion in Last Interglacial Sea Level Rise." *Geophysical Research Letters* 38 (14). <https://doi.org/10.1029/2011GL048280>.
- Moss, Richard H., Jae A. Edmonds, Kathy A. Hibbard, Martin R. Manning, Steven K. Rose, Detlef P. van Vuuren, Timothy R. Carter, et al. 2010. "The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment." *Nature* 463 (7282): 747–56. <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>.
- Muis, Sanne, Maialen Irazoqui Apecechea, Job Dullaart, Joao de Lima Rego, Kristine Skovgaard Madsen, Jian Su, Kun Yan, and Martin Verlaan. 2020. "A High-Resolution Global Dataset of Extreme Sea Levels, Tides, and Storm Surges, Including Future Projections." *Frontiers in Marine Science* 7 (April): 1–15.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>.
- Muis, Sanne, Martin Verlaan, Hessel C. Winsemius, and Philip J. Ward Jeroen C. J. H. Aerts. 2016. "A Global Reanalysis of Storm Surges and Extreme Sea Levels." *Nature Communications, Articles* 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms11969>.
- Munk, Walter, Matthew Dzieciuch, and Steven Jayne. 2002. "Millennial Climate

- Variability: Is There a Tidal Connection?" *Journal of Climate* 15 (4): 370–85.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C0370:MCVITA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C0370:MCVITA%3E2.0.CO;2).
- 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*.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>.
- Nicolai, Robin, Guus Rongen, and Fedor Baart. 2016. "Zeespiegelmonitor. Eenduidige indicatoren." december. Lelystad, Delft: Deltares, HKV.
- Nicolai, Robin, and Job Verkaik. 2020. "Advies kenmerkende waarden kust. Overzicht zeespiegelindicatoren." Lelystad: HKV, Deltares.  
<https://kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/70785>.
- Nutley, Sandra M, Peter C Smith, and Huw TO Davies. 2000. *What Works?: Evidence-Based Policy and Practice in Public Services*. Policy Press.
- Oerlemans, C, T Botterhuis, R. Nicolai, and F. Baart. 2022. "Zeespiegelstijging in ontwerpnormen stormvloedkeringen. Inventarisatie van zeespiegelstijging in ontwerpnormen van de Oosterscheldekering en de Maeslantkering." Lelystad: HKV; Deltares. <https://kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000020898>.
- Pickard, George L, and William J Emery. 2016. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. Elsevier.
- 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.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.02.004>.
- 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.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.016>.
- Rignot, Eric, Isabella Velicogna, Michael R van den Broeke, Andrew Monaghan, and Jan T M Lenaerts. 2011. "Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise." *Geophysical Research Letters* 38 (5).
- Roemmich, Dean, and John 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.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.03.004>.
- Rutte, Minister President Mark. 2016. "Toespraak Minister-President Rutte Tijdens Het Trade Dinner in Seoul." <https://www.rijksoverheid.nl/regering/bewindspersonen/mark-rutte/documenten/toespraken/2016/09/27/toespraak-minister-president-rutte-tijdens-het-trade-dinner-in-seoul>.
- Samenwerkingsverband Maasvlakte 2. 1998. *Ontwerpnota Maasvlakte 2 : Rapportage Ontwerponderzoek Fase 1B*. Rotterdam: Samenwerkingsverband Maasvlakte 2 Varianten.
- Sanderson, Ian. 2002. "Evaluation, Policy Learning and Evidence-Based Policy Making." *Public Administration* 80 (1): 1–22.  
<https://doi.org/10.1111/1467-9299.00292>.
- 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): 279–97.  
<https://doi.org/10.1080/01490410490465265>.
- Schlesinger, Michael E., and Navin Ramankutty. 1994. "An Oscillation in the Global Climate System of Period 65–70 Years." *Nature* 367 (February): 723 EP–.  
<http://dx.doi.org/10.1038/367723a0>.
- Shepard, F. P., and H. E. Suess. 1956. "Rate of Postglacial Rise of Sea Level." *Science* 123 (3207): 1082–83. <https://doi.org/10.1126/science.123.3207.1082-a>.
- Signaalgroep Deltaprogramma. 2018. "Advies Signaalgroep in het kader van

- 6-jaarlijkse herijking.” Den Haag.  
<https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/documenten/publicaties/2019/09/17/dp2020-a-advies-signaalgroep-in-het-kader-van-de-zesjaarlijkse-herijking>.
- Slobbe, DC, Roland Klees, Martin Verlaan, LL Dorst, and Herman 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.
- Smeed, DA, G McCarthy, SA Cunningham, E Frajka-Williams, D Rayner, WE Johns, CS Meinen, et al. 2014. “Observed Decline of the Atlantic Meridional Overturning Circulation 2004–2012.” *Ocean Science* 10 (1): 29–38.
- Stammer, Detlef, Anny Cazenave, Rui M. Ponte, and Mark E. Tamisiea. 2013. “Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes.” *Annual Review of Marine Science* 5 (1): 21–46. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172406>.
- Steffelbauer, David B, Riccardo E M Riva, Jos S Timmermans, Jan H Kwakkel, and Mark Bakker. 2022. “Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea.” *Environmental Research Letters* 17.
- Stocker, Thomas F, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, M Tignor, Simon K Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, and Pauline M Midgley. 2013. “Climate Change 2013: The Physical Science Basis.” Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Stocker, Thomas F, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, Simon K Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M Midgley, and others. 2013. “Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for Decision-Makers.” Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat/Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC.
- Talley, L. D., R. A. Feely, B. M. Sloyan, R. Wanninkhof, M. O. Baringer, J. L. Bullister, C. A. Carlson, et al. 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.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-marine-052915-100829>.
- Tapley, Byron D, Michael M Watkins, Frank Flechtner, Christoph Reigber, Srinivas Bettadpur, Matthew Rodell, Ingo Sasgen, et al. 2019. “Contributions of GRACE to understanding climate change.” *Nature Climate Change* 9 (5): 358–69.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>.
- Team, The IMBIE. 2018. “Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017.” *Nature* 558 (7709): 219–22. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>.
- Toom, Matthijs den. 2017. “Reproduceerbaarheid zeespiegelprojecties.” Delft: Deltares. <https://pub.kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000020847>.
- UNESCO/IOC. 2020. “Quality control of in situ sea level observations. A review and progress towards automated quality control.” IOC Manuals and Guides. Paris: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373566>.
- van Dam, Petra JEM. 2018. *Van Amsterdams Peil Naar Europees Referentievlak: De Geschiedenis van Het NAP Tot 2018*. Uitgeverij Verloren.
- Van Dantzig, D. 1960. “Bijdragen II. Beschouwingen over Stormvloed en Getijbeweging.” Mathematisch Centrum.
- van den Hurk, Bart, Peter Siegmund, Albert Klein Tank, Jisk Attema, Alexander Bakker, Jules Beersma, Janette Bessembinder, et al. 2014. “KNMI’14: Climate Change Scenarios for the 21st Century—a Netherlands Perspective.” Scientific Report WR2014-01. De Bilt, The Netherlands: KNMI.
- van der Weele, Pieter Izaak. 1971. *De Geschiedenis van Het NAP*. Rijkscommissie voor Geodesie.
- van Koningsveld, M., and J. P. M. Mulder. 2004. “Sustainable Coastal Policy



- Developments in the Netherlands. A Systematic Approach Revealed." *Journal of Coastal Research*, 375–85.  
[https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)020%7B\\$%5B\\$%7D0375:SCPDIT%7B\\$%5D\\$%7D2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)020%7B$%5B$%7D0375:SCPDIT%7B$%5D$%7D2.0.CO;2).
- van Veen, J. 1945. "Bestaat Er Een Geologische Bodemdaling Te Amsterdam Sedert 1700." *Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap* 2 (62): 2–36.
- . 1954. "Tide-gauges, subsidence-gauges and flood-stones in the Netherlands." *Geol. Mijnbouw*.
- Vermeersen, Bert L. A., Aimée B. A. Slangen, Theo Gerkema, Fedor Baart, Kim M. Cohen, Sönke Dangendorf, Matthias Duran-Matute, et al. 2018. "Sea-Level Change in the Dutch Wadden Sea." *Netherlands Journal of Geosciences* 97 (3): 79–127. [https://doi.org/DOI: 10.1017/njg.2018.7](https://doi.org/DOI:10.1017/njg.2018.7).
- Vignudelli, Stefano, Andrey G Kostianoy, Paolo Cipollini, and Jérôme Benveniste. 2011. *Coastal Altimetry*. Springer Science; Business Media.
- Visser, Hans, Sönke Dangendorf, and Arthur 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): 3873–95. <https://doi.org/10.1002/2015JC010716>.
- Voosen, Paul. 2017. "Deep Pacific Cooled by 'Little Ice Age' Waters." *Science* 358 (6370): 1515–16. <https://doi.org/10.1126/science.358.6370.1515>.
- Wada, Y., M. F. P. Bierkens, A. de Roo, P. A. Dirmeyer, J. S. Famiglietti, N. Hanasaki, M. Konar, et al. 2017. "Human–Water Interface in Hydrological Modelling: Current Status and Future Directions." *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (8): 4169–93. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4169-2017>.
- Wada, Yoshihide, Ludovicus P. H. van Beek, Cheryl M. van Kempen, Josef W. T. M. Reckman, Slavek Vasak, and Marc F. P. Bierkens. 2010. "Global Depletion of Groundwater Resources." *Geophysical Research Letters* 37 (20). <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>.
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003>.
- Watkins, Michael M., David N. Wiese, Dah-Ning Yuan, Carmen Boening, and Felix 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): 2648–71. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>.
- Watson, Phil J. 2016. "Identifying the Best Performing Time Series Analytics for Sea Level Research." In *Time Series Analysis and Forecasting*, 261–78. Springer.
- Wemelsfelder, P. J. 1958. "Invoering van de Nulpalen." Rijkswaterstaat.
- Woodworth, Philip L, Angélique Melet, Marta Marcos, Richard D Ray, Guy Wöppelmann, Yoshi N Sasaki, Mauro Cirano, et al. 2019. "Forcing Factors Affecting Sea Level Changes at the Coast." *Surveys in Geophysics* 40 (6): 1351–97. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09531-1>.
- Wunsch, Carl, and Detlef Stammer. 1997. "Atmospheric loading and the oceanic inverted barometer effect." *Review of Geophysics* 35: 79–107.
- Zeileis, Achim. 2004. "Econometric Computing with HC and HAC Covariance Matrix Estimators." *Journal of Statistical Software, Articles* 11 (10): 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v011.i10>.
- Zlotnicki, Victor, Zheng Qu, and Joshua Willis. 2016. "JPL MEaSUREs Gridded Sea Surface Height Anomalies Version 1609." PO.DAAC; Dataset. <http://dx.doi.org/10.5067/SLREF-CDRV1>.

# A Lijst met afkortingen

<b>20CR</b>	20th Century (Climate) Reanalysis
<b>AGRS</b>	Actief GNSS Referentie Systeem
<b>AHN</b>	Actueel Hoogtebestand Nederland
<b>AIC</b>	Akaike Informatie Criterium, (een maat voor de goodness-of-fit van een model)
<b>AMO</b>	Atlantic Multidecadal Oscillation
<b>AR</b>	Autoregressie
<b>Argo</b>	Argo, vernoemd naar schip uit de Griekse mythologie
<b>BGT</b>	Basisregistratie Grootchalige Topografie
<b>BRK</b>	Basisregistratie Kadaster
<b>DG</b>	Directoraat-generaal
<b>DNM</b>	Digitale Niveau Meter
<b>ECCO</b>	Estimating the Circulation and Climate of the Ocean
<b>ENW</b>	Expertisenetwerk Waterveiligheid
<b>ERSST</b>	Extended Reconstructed Sea Surface Temperature
<b>ETRS89</b>	European Terrestrial Reference System 1989
<b>EZK</b>	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
<b>GAM</b>	Generalized Additive Model
<b>GIA</b>	Glacial Isostatic Adjustment, postglaciale opheffing
<b>GLM</b>	Generalized Linear Model
<b>GMSL</b>	Global Mean Sea Level, globaal gemiddeld zeeniveau
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite 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>HAC</b>	Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent
<b>HHNK</b>	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
<b>IHO</b>	International Hydrographic Organization
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>JASON</b>	Joint Altimetry Satellite Oceanography Network
<b>K1</b>	Lunar diurnal constituent
<b>KNMI</b>	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
<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>M2</b>	Principal lunar semidiurnal constituent
<b>M4</b>	Shallow water overtides of principal lunar constituent
<b>MCMC</b>	Markov chain Monte Carlo
<b>MLLW</b>	Mean Lower Low Water. The average of the lower low water height of each tidal day observed over the National Tidal Datum Epoch. <a href="https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum_options.html">https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum_options.html</a>
<b>MN4</b>	Shallow water quarter diurnal constituent
<b>MS4</b>	Shallow water quarter diurnal constituent
<b>MSL</b>	Mean Sea Level
<b>MU2</b>	Variational constituent
<b>MWP</b>	Meltwater Pulse
<b>MorphAn</b>	Morphological Analysis
<b>N2</b>	Larger lunar elliptic semidiurnal constituent
<b>NAO</b>	North Atlantic Oscillation

**NAP** Normaal Amsterdams Peil  
**NCEP** National Centers for Environmental Prediction  
**NCEP1** National Centers for Environmental Prediction  
**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration  
**O1** Lunar diurnal constituent  
**PBL** Planbureau voor de Leefomgeving  
**PSMSL** Permanent Service for Mean Sea Level  
**ROFI** Region Of Freshwater Influence  
**RWS** Rijkswaterstaat  
**S2** Principal solar semidiurnal constituent  
**SLF** Sea Level Fingerprint  
**TNO** Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek  
**WBI** Wettelijke BeoordelingsInstrumentarium  
**WCRP** World Climate Research Programme  
**WGS84** World Geodetic System 1984

## B Aansluiting en raakvlakken

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, Stive, and Hall 2007; Portman et al. 2012) kustbeheer. In die lijn passen ook de onderzoeken, waar dit een vervolg op is, van D. Dillingh, Baart, and de Ronde (2010), de Ronde et al. (2014) en F. Baart et al. (2015). De term 'evidence based' is overgewaaid uit het Verenigd Koninkrijk en de volksgezondheid (Nutley, Smith, and Davies 2000; Sanderson 2002).

In D. Dillingh, Baart, and de Ronde (2010) werd een eerste definitie gegeven van de zeespiegelstijging in de context van het suppletiebeleid. Er werd bepaald dat rekening gehouden moet worden met geodetische datum verandering (NAP-correctie) en met fysische processen (nodaal getij, zie paragraaf F.4.5, luchtdruk, zie paragraaf F.4.3). 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 KNMI. Tenslotte hebben D. Dillingh, Baart, and de Ronde (2010) de satelliet metingen van de absolute zeespiegel vergeleken met de metingen van de getijstations.

In D. 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)** (William S. 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.

F. 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.

Fedor Baart et al. (2019) hebben de invloed van wind, luchtdruk en nodaal getij verder onderzocht om een nauwkeuriger zeespiegel en -stijging te kunnen berekenen. Een versnelling van de zeespiegel werd getest met twee verschillende versnellingsmodellen, een kwadratische versnelling, en een knikpunt. Er werd geen significante versnelling geconstateerd. Verder werden de metingen langs de Nederlandse kust vergeleken met metingen door satellieten, en met de geprojecteerde zeespiegel tot 100 jaar vooruit. Er werd aanbevolen om de aansluiting van metingen en projecties extra aandacht te geven. Er werd verder geadviseerd om de reproduceerbaarheid van kenmerkende waarden te versterken.

Er wordt in veel onderzoeksprogramma's en door verschillende instituten gerefereerd aan, of gebruikt gemaakt van de zeespiegel langs de Nederlandse kust zoals die in de Zeespiegelmonitor berekend wordt. We maken hier onderscheid onder:

- Onderzoeksprogramma's, kennisprogramma's en onderzoeksprojecten: vaak meerjarige projecten of gebundelde projecten met als doel om kennis te vergroten/verdiepen
- Instituten die betrokken zijn bij de onderzoeksactiviteiten
- Dashboards: Visueel ingestelde informatiebronnen op internet die met als doel om kennis publiek te delen

Een actuele lijst met raakvlakken staat in appendix B.

#### **Programma's**

- [Onderzoek bodemdaling](#)
- [Onderzoeksprogramma Kustgenese](#)
- [Onderzoeksprogramma BenO Kust](#)
- [Kennisprogramma Zeespiegelstijging \(KPZSS\)](#)
  - [KP ZSS- Spoor I - Zeespiegelstijging en Antarctica](#)
  - [KP ZSS- Spoor II - Systeemverkenningen](#)
  - [KP ZSS- Spoor III - Signaleringsmethodiek](#)
  - [KP ZSS- Spoor IV - Langetermijnopties](#)
  - [KP ZSS- Spoor V - Implementatiestrategie](#)
- [Hoogwaterbeschermingsprogramma \(HWBP\)](#)

#### **Instituten**

- [NIOZ](#)
- [Universiteit Utrecht](#)
- [TU Delft](#)
- [KNMI](#)
- [Deltares](#)
- [TNO](#)
- [PBL](#)

#### **Dashboards** gericht op de Nederlandse zeespiegel

- [Compendium voor de leefomgeving - Klimaatverandering dashboard - Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust en mondiaal, 1890-2018](#)
- [Zeespiegelmonitor dashboard - Gemeten en geprojecteerde zeespiegel langs de Nederlandse kust](#)
- [KNMI - Klimaatverandering dashboard - Zeespiegel](#)
- [Deltaprogramma signaaldashboard - zeespiegel](#)
- [Bodemdalingsmonitor](#)

### **Mondiale dashboards**

- European Environmental Agency (EEA) dashboard of [Global and European sea level rise](#)
- NASA Vital Signs of the Planet - [Sea Level](#)

## **C      Rapporten en memo's**

In het kader van de ontwikkeling van de Zeespiegelmonitor voor de komende jaren zijn in 2022 twee workshops gehouden met als doel om de methoden en onderzoeksvragen binnen de Zeespiegelmonitor voor de komende jaren op een breed gedragen manier vast te leggen. De uitkomsten zijn gebruikt in de rapportage, en komen terug in hoofdstuk 2.

### **C.1      Verslag workshop Zeespiegelmonitor methodiek\*\***

## Memo

<b>Datum</b> 17 oktober 2022	<b>Ons kenmerk</b> 11208038-000-ZKS-0004	<b>Aantal pagina's</b> 1 van 5
<b>Contactpersoon</b> Willem Stolte	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88 335 8598	<b>E-mail</b> Willem.Stolte@deltares.nl

**Onderwerp**  
Workshop Zeespiegelmethodiek verslag final

## Workshop Evaluatie/ontwikkeling van methodiek

KPP Kustbeleid (Zeespiegelmonitor)  
Datum: 04-07-2022  
Status: concept

Procedure: Van te voren is een vragenlijst uitgestuurd naar alle deelnemers. De antwoorden op de open vragen werden verzameld. Een samenvatting van de antwoorden is gepresenteerd op de workshop, waarna er discussie plaatsvond per vraag/thema. De vragen met antwoorden zijn te vinden in de appendix. Deze memo is een samenvatting van de presentatie en de discussies die aan de hand van deze presentatie is gevoerd.  
Deelnemers:

Op dit moment gebruiken we de 6 hoofdstations om de Nederlandse kust te representeren. Wat zou je daaraan veranderen en waarom?

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Geen bezwaar
- Wel: Duidelijkheid krijgen over, en rekening houden met bijzonderheden per station. Info over kwaliteit toevoegen (bijv. analyse Firmijn)
- Evt overige stations in koninkrijk meenemen (satellietmetingen)

Discussie naar aanleiding hiervan:

- Metadata toevoegen aan stations
- Controle en evt correcties op metingen vindt nu plaats door RWS
- Andere stations kunnen toegevoegd worden ter validatie

Op dit moment bereken we de zeespiegelstijging over verschillende periodes (1890 - nu) en een gebroken zeespiegelstijging van 1890 tot 1993 en 1993 tot nu. Over welke periode zou je de trend wille...

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Hele periode
- Trend per 37 (evt 18.5) jaar. Range aan perioden.
- Fysische onderbouwing van keuze
- Periode die het meest zegt over trend voor komende 15 jaar



- Baseren op evt wijzigingen in meetmethodiek (nulpalen)
- Versnellingsmodel laten beginnen bij 1960 (Koppel aan versnelling temperatuurstijging)

Discussie naar aanleiding hiervan:

- De keuze voor 37 jaar is gemotiveerd door dat het 2 x de nodale getijcyclus is. Fedor merkt op dat, om het effect van het nodale getij te minimaliseren, beter voor 1,5 x die periode ( $1,5 \times 18,6 = 27,9$  jaar) gekozen kan worden.
- Keuzes voor de beschouwde periode kunnen helpen om niet-verklaarbare variatie die niet met zeespiegelstijging te maken heeft te verminderen. Een voorbeeld is het gebruiken van nulpalen voor de verticale referentie van meetstations. In 1960 vond de 2<sup>e</sup> waterpassing plaats. Dat kan ook een motivatie zijn om de periode na 1960 te beschouwen.
- Een fysische onderbouwing van de keuze voor de te analyseren tijdperiode kan samenhangen met bijv bouw van stuwmeren

Verandering/toevoeging aan de huidige methodiek:

- Overweeg om additioneel aan de gehele periode ook een gelimiteerde periode te analyseren op basis van bovenstaand.
- Overweeg om de trend uit te rekenen per periode van 1,5 x 18,6 jaar. Refereer naar eerder werk waar dit is uitgezocht.
- Een overzicht van gebeurtenissen die een trendbreuk in de zeespiegel, dan wel de meting daarvan hebben kunnen veroorzaken is wenselijk.
  - 1960: 2<sup>e</sup> waterpassing
  - 1980: invoering nulpalen
  - 1960: begin bouw grote stuwmeren
  - Etc.

Op dit moment wordt afgeraden om de huidige zeespiegeltrend te gebruiken voor meer dan 15 jaar vooruit? Hoe zou jij het gebruik van de zeespiegelstijging voor de nabije (0-15 jaar vooruit) toekoms...

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Consistente trend uit combinatie van (gecorrigeerde) metingen en projecties halen
- Gebruik een range gebaseerd op lange termijn trendberekeningen
- Meerdere bronnen gebruiken en weging toepassen
- Periodiek bepalen
- Frequentie van verhoging van processen die afhankelijk zijn van zeespiegel → verkort de vooruitkijkperiode

Discussie naar aanleiding hiervan:

- Het klopt dat suppleties voornamelijk reactief zijn, maar vooruit kijken blijft nodig voor langjarig beleid.

Op dit moment wordt voor verschillende variabelen "gecorrigeerd". Wat vind je de "echte zeespiegelstijging"?

Wat moet er in en wat moet er uit, en waarom?

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Uitdrukken tov NAP
- Uit: wind, getij, oceanstromingen, decadale windvariatie
- Mondiaal gemiddelde. Lokale stijging uitdrukken als anomalie
- Laat zien (per station) wat invloed is van verklaarbare variabelen
- Correcties moeten voor hele periode gelden
- ZS zonder correcties. Alle verklaarbare variabelen uitdrukken in ZS bijdragen.
- Uitzoomen van oneigenlijk gebruik ZSS, Focus op "hoe gunstig ligt Nederland" t.o.v. mondiaal

Discussie naar aanleiding hiervan:

- Er zijn in grote lijnen twee mogelijkheden
  - Eerst alle verklaarbare variatie wegfilteren per station, daarna evt middelen, en trend berekenen.
  - Trend berekenen waarbij alle verklaarbare variatie wordt meegenomen als covariant over gemiddelde waterstanden. Verklaarbare variabelen als ZS bijdragen uitdrukken.
- Er moet nog meer aandacht besteed worden aan bodemdaling.
- GTSM wordt nu al gebruikt voor verklaring wind en getij, maar nog niet voor de hele meetperiode.

Verandering/toevoeging aan de huidige methodiek:

- Beide varianten meenemen in de Zeespiegelmonitor. Er kan ook nog gedacht worden aan een combinatie van de twee (versie twee voor alle afzonderlijke stations.)

Op dit moment wordt de zeespiegelstijging voor Nederland berekend door de 6 hoofdstations te middelen. Dat is de "gemiddelde Nederlandse zeespiegel". Zou je dat anders aanpakken?

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Zowel gemiddelde als afzonderlijke stations
- Probeer per station verklaarbare variatie te elimineren voor "schoner" signal, daarna middelen
- Correlatie van residu tussen stations onderzoeken en gebruiken als additionele verklaring van variatie
- Zijn verschillen verklaarbaar? Recent afwijkende metingen gevonden
- Delfzijl – NAP correcties

Discussie naar aanleiding hiervan:

- Weinig verschil van mening over dit punt. Wel vind met het belangrijk om ook de afzonderlijke stations te laten zien.

Op dit moment zijn er een paar varianten in omloop van de "versnelling" (geen, knik, decadale versnelling (bijv Loess, GAM), kwadratische versnelling sinds 1993, kwadratische versnelling sinds ~19...

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Huidige methodiek
  - **1890-nu lineair (referentie)**
  - **1890-nu kwadratisch**
  - **1890-1993-nu knik (vooral voor vergelijking met satellietmetingen)**
- Toevoegen: Loess met 60 jaar window voor exploratieve trend.
- Perioden van 37 (18.5) jaar vergelijken
- Versnellingsmodel fysisch verklaarbaar? Kwadratisch beter dan knikpunt
- Kans toetsen dat metingen binnen een versnellingsmodel valt
- Versnelling aan NL kust niet zo relevant. Focus op processen die ZW 10-15 jaar vooruit voorspellen
- Knikpunt zoeken t.o.v. gemiddelde
- Loess or B-spline informatief. GAM voor combinatie met multi-lineaire regressie
- Gebruik AIC bij simpele modellen (knikpunt, quadratisch)

Discussie naar aanleiding hiervan:

- Belangrijk om budgetberekeningen te laten zien. Dit is lastig voor de periode voor 1950.
- 

We zijn als mens vooringenomen. Daarom worden onderzoeken vaak blind uitgevoerd. Hoe kunnen we dit onderzoek "blind" uitvoeren?

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Huidig: methodiek vastleggen voordat je de data ziet. Methode vastleggen voor komende jaren'
- Wat is de zeespiegel over 10-15 jaar?
- Hoeft/kan niet blind
- Op tijd (niet te laat, maar ook niet te vroeg) veranderingen detecteren
- Concept past niet bij klimaatonderzoek

Discussie naar aanleiding hiervan:

- Een extra test kan zijn om dezelfde methode toe te passen op nieuwe stations in NL of daar net buiten.
- Bij het testen van het meest geschikte model zou KNMI de "neutrality" methode willen toepassen. Dit houdt in: laat het AIC criterium beslissen welk model het beste is, zonder aanname van een nul-hypothese.
- RWS vind continuïteit belangrijk bij advies van de regering. Geen nieuwe methode kiezen wanneer dat niet strikt noodzakelijk is.
- Deltares vind het op de proef stellen van modellen (hypothese testen) een belangrijk onderdeel van de wetenschappelijke methode.

Verandering/toevoeging aan de huidige methodiek:

- Pas methodiek toe op nieuwe stations en vergelijk de uitkomst als bijvoorbeeld een split-group validation
- De methode zonder nul-hypothese (hierboven "neutrality") wordt door Deltares gezien als een confirmatieve aanpak. De huidige methode, waarbij getracht wordt de situatie zonder effect (versnelling, afwijking van een rechte lijn) te falsifiëren, wordt als een sterkere methode gezien. Tezamen met het argument van continuïteit is er nu geen reden om af te wijken van de huidige methode.

Er zijn veel verschillende statistische technieken in omloop voor het bepalen van zeespiegel trends (frequentistisch, computational, bayesiaans, bijv. LOESS, GLM, OLS, ARIMA, NN, GAM, MCMC, State ...

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Zo simpel mogelijk, is makkelijker uit te leggen
- Testen van hypothese leidde in vorig rapport tot "verkeerde" uitleg. Moet voorkomen worden (de verkeerde uitleg).
- LM + eventueel AR 1 (dan is het GLM)
- MCMC (voor bayesiaanse uitspraken)
- LOESS (voor exploratieve tijdsafhankelijke trend op residu)

Discussie naar aanleiding hiervan:

- Maak onzekerheden expliciet
- Overweeg bandbreedte over (bijvoorbeeld) afgelopen 10 jaar in plaats van 1 waarde voor zeespiegel en -stijging

Verandering/toevoeging aan de huidige methodiek:

- Methode voor bandbreedte toevoegen aan onderzoeksagenda.

De oude rapportage was in pdf formaat. De nieuwe rapportage komt primair online te staan (html, interactief). Hoe zou je daar gebruik van maken?

Samenvatting antwoorden zoals gepresenteerd op de workshop:

- Interactiviteit wordt gebruikt
- PDF versie ook nodig
- Doorklikken naar visualisatie en ontsluiting van metingen.
- Makkelijk vindbaar
- Evt ook korte folder maken
- Grafieken met/zonder opties voor verschillende trends, tijden, methoden
- Selectie van alle stations ter wereld met basisanalyse
- Kaartje met alle stations ter wereld inclusief analyse tonen.

Hier was weinig discussie over

Verandering/toevoeging aan de huidige methodiek:

- In ieder geval een "bevoren" pdf versie maken.

## C.2 Verslag workshop onderzoeksagenda 2023-2025

## Memo

**Datum** 17 oktober 2022  
**Contactpersoon** Willem Stolte  
**Ons kenmerk** 11208038-000-ZKS-0002  
**Doorkiesnummer** +31(0)88 335 8598  
**E-mail** Willem.Stolte@deltares.nl  
**Aantal pagina's** 1 van 10

**Onderwerp**  
Workshop Onderzoeksagenda ZSM verslag final

### ***Onderzoeksvragen Zeespiegelmonitor voor de komende jaren”***

Aantekeningen van een workshop gehouden op  
15 juni 2022, 10:00 – 13:00,  
Seats2Meet, Utrecht CS, zaal Ocean.

#### Aanwezigheid

<b>Willem Stolte (notities)</b>	<b>WS</b>	<b>Deltares</b>	<b>present</b>
Saskia van Gool	QL	Rijkswaterstaat	present
Rena Hoogland	RH	Rijkswaterstaat	present
Quirijn Lodder	QL	Rijkswaterstaat	present tot 12:10
Robert Vos	RV	Rijkswaterstaat	present
Robert Slomp	RS	Rijkswaterstaat	present
Frank Hallie	FH	Min IenW, DGWB	present
Dewi de Bars	DB	KNMI	present
Sybrein Drijfhout	SD	KNMI	present
Robin Nicolai	RN	HKV	present
Dorien Honingh	DH	HKV	present
Fedor Baart	FB	Deltares	present
Bart van den Hurk	BH	Deltares	niet present, betrokken bij voorbereiding en uitwerking
Marcel Taal	MT	Deltares	present
Sanne Muis	SM	Deltares	present

## Introductie – Frank Hallie, Saskia van Gool

De Zeespiegelmonitor (formele naam: KPP Kustbeleid) valt onder BOA (Beleids Ondersteuning en Advies) Kust.. In 2022 is de oplevering van een rapportage van het onderzoek dat de afgelopen jaren is uitgevoerd. Om weer vooruit te kijken naar welk onderzoek de komende 4 jaren nodig is in behoefte aan een nieuwe onderzoeksagenda. De workshop is ook een belangrijk moment voor inhoudelijke afstemming tussen de verschillende partijen.

## 1 Deel 1: Doelen Zeespiegelmonitor

### 1.1 Presentatie Quirijn Lodder (RWS)

#### 1.1.1 Doelen Zeespiegelmonitor

##### 1.1.1.1 Uitgangspunt (Advies ENW 2010):

- Vaststellen van de **in Nederland optredende zeespiegelstijging**.
- Periodiek rapporteren over de optredende **relatieve en absolute zeespiegelstijging**.
- **Koppeling KNMI scenario's**.

##### 1.1.1.2 Later bij gekomen doelen (2014):

- Vaststellen of er (significant) sprake is van een **versnelling in zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust**.
- Vaststellen methodiek aansluitend bij **toepassing sedimentbehoefte kuststelsysteem**.

Er is consensus over dat de bovenstaande doelen behouden blijven. Hierop voortbordurend, en in aanmerking genomen de discussies is er behoefte aan verfijning op sommige punten. Rijkswaterstaat stelt de volgende toevoegingen voor aan de bovenstaande omschrijving:

#### 1.1.2 Gebruik en gebruikers van de Zeespiegelmonitor resultaten

- Rapportage optredende zeespiegelstijging aan de Tweede Kamer,
- Bepaling sedimentbehoefte van de kust (en afgeleide daarvan suppletievolumes),
- Actualiseren van de hydraulische belastingen voor de waterkeringen en andere hydraulische parameters (onderdeel Beoordeling en Ontwerp Instrumentarium)
- Detectie versnelling Zeespiegelstijging NL kust,
- Mogelijk indicator voor vaststellen van de gebruiksruimte voor Delfstoffenwinning Waddenzee, (loopt via EZK)
- Watermanagementcentrum Nederland (waarschuwingsdienst Kust). (Later toegevoegd)
- Basisindicator voor veel doeleinden (systeemkennis, validatie prognoses bv spuibeik IJsselmeer)
- Publieke opinie/ pers en communicatie

#### 1.1.3 Eerder opgehaalde behoeften door DGWB en RWS

- Overzicht gehele keten zeespiegelstijging Nederlandse kust/ Noord-West Europa
- Oorzaken huidige zeespiegelstijging
- Oorzaken verwachte versnelling zeespiegelstijging
- Huidige methode om huidige en verwachte ZSS te detecteren (meten, methodiek)

- Mogelijke andere methoden om te detecteren (o.a. gebruik satellietdata vs. waterstandsmetingen)

#### 1.1.4 Alle basisinformatie in de nieuwe rapportage

- Beschrijving verschillende methodes voor bepalen trend
- Opnieuw vastleggen definitie zeespiegelstijging
- Behoeft aan een vergelijking tussen de metingen in Noord-West Europa
- Variaties jaargemiddelde waterstandsmetingen per station terugrekenen

#### 1.1.5 Betere ontsluiting en visualisatie

Rijkswaterstaat heeft tot nu toe geen producten (grafieken, trends) ontsloten over de Nederlandse zeespiegel. De wens is om dit te veranderen. Er wordt gekeken hoe dit het best georganiseerd gaat worden. Freya Fenwick en Rena Hoogland onderzoeken de mogelijkheid om producten te ontsluiten via <https://waterinfo-extra.rws.nl>

#### 1.1.6 Betere samenwerking KNMI

Het is om verschillende redenen wenselijk dat de berekende zeespiegelstijging door Deltares overeen komt met de analyses van KNMI, en als dat niet zo is, dat hier dan een goede uitleg is. Een actie is dat KNMI is uitgenodigd om mee te denken bij de evaluatie van de methodiek.

#### 1.1.7 Methode criteria voor bepaling van zeespiegelstijging en versnelling

Rijkswaterstaat stelt aanvullingen voor op de huidige criteria die gehanteerd worden voor de in de afgelopen jaren gebruikte methodiek (beschreven in zeespiegelmonitor 2018).

Zeespiegelmonitor 2018	Commentaar/aanvulling RWS
<b>Stabiliteit:</b> methode moet niet van jaar tot jaar te veel variëren.	<u>Gegeven vastgestelde methode conclusies trekken. Andere methodes geven andere conclusies, analoog aan hydraulische belastingen voor waterkeringen wil je de methode niet te vaak aanpassen.</u>
<b>Spaarzaamheid:</b> principe dat de eenvoudigste van twee plausibele verklaringen de voorkeur heeft.	<u>Nul hypothese aansluiten bij wat we fysisch verwachten: een versnellende zeespiegelstijging. We toetsen of we die versnelling statistisch significant kunnen aantonen. Als dat niet lukt is de conclusie niet dat er geen versnelling is, maar dat we die niet statistisch kunnen aantonen.</u>
<b>Robuustheid:</b> trend moet niet te veel afhangen van modelkeuzes en periodes.	<u>Eens. Belangrijk moet zijn waarvan we de trend presenteren. Bv: ZSS incl of excl decadale variaties door wind, incl of excl bodemdaling?</u>
<b>Voorspelkracht:</b> toepassing van statistisch model in het verleden een goede hindcast opleveren.	<u>Eens, methode moet voldoende voorspelkracht hebben voor orde komende 10 - 15 jaar.</u>
<b>Behoudend:</b> methode moet temporeel aansluiten.	<u>Eens</u>
<b>Generaliseerbaarheid:</b> methode moet ook werken bij andere stations dan in Nederland.	<u>Methode moet ook goed werken bij (andere) stations in Nederland. Voor Den Helder en Harlingen zijn bv andere correcties nodig dan voor IJmuiden door de Afsluitdijk. Daar</u>



	<u>zou de methode rekening mee moeten houden.</u>
<b>Power:</b> als er een versnelling is moet de methode dat snel detecteren.	Herformuleren naar: <u>methode moet versnelling ZSS snel en eenduidig detecteren.</u>

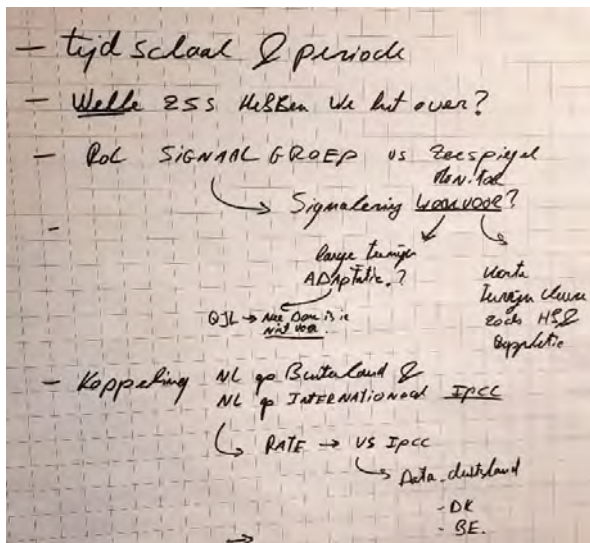
#### 1.1.8 Verdere belangrijke details voor bepalen

- Meetprotocol correct en transparant
- Metingen betrouwbaar en terug vindbaar
- Route PSMSL nog steeds de juiste? Check nodig PSMSL en data RWS – **Deze vraag wordt opgenomen in de onderzoeksagenda.** Een correctie wordt gemaakt voor Delfzijl. Deze komt niet voor eind 2022 beschikbaar. Dit jaar (2022) wordt in de rapportage een analyse opgenomen met en zonder Delfzijl, om de gevoeligheid van de zeespiegel voor dit station mee te nemen in de conclusies
- Metadata terug vindbaar, incl. historie. Dit jaar komt een eerste actie, door publicatie van data en metadata via Waterinfo Extra.
- Definitie zeespiegelstijging - Conceptueel uitdenken Bodemdaling en zeespiegelstijging.
- Correcties verklaarbare variaties jaargemiddelde waterstanden per station op basis van eenduidige en herleidbare heranalyses met waterbewegingsmodellen (besluit welke modellen, globaal of Noordzee regio)

#### 1.1.9 Vragen & discussie naar aanleiding van presentatie RWS

- Sybren: Wat bedoelen we met de zeespiegel en de zeespiegelstijging. Zou eerst overeenstemming over moeten worden bereikt. – **Deze vraag is al opgenomen in de Zeespiegelmonitor (2018), en zal naar aanleiding van opmerkingen hierboven (RWS) opnieuw worden meegenomen in de rapportage.**
- Fedor: Periode (tijdschaal) belangrijk bij berekening. – **Deze vraag nemen we mee naar de inhoudelijke methodiek discussie op later tijdstip**
- Frank: Is methode via getijdenstations nog steeds de beste methode? Stabiliteit is goed, maar als betere methodes beschikbaar komen, moeten we daar niet blind voor zijn - **dit komt nog bij onderzoeksvragen aan bod.**
- Robin: Is detecteren versnelling een doel van de ZSM? – **Volgens RWS inleiding (hierboven) wel. Wel moet het algemene doel in aanmerking worden genomen. Hiervoor is een predictie van 10-15 jaar vooruit voldoende.**
- Saskia sluit aan: is signalering een doel, of hoort dat in Spoor 3 (signalering) thuis. – **Uit discussie lijkt dat dit nog niet actief is opgepakt in Spoor 3. Een versnelling aantonen voor Nederlands kustwater lijkt op dit moment aan de orde. De precieze methodiek wordt later besproken.**
- Sybren: uitsplitsen bodemdaling, langjarige trends en fluctuaties. Stijging en Versnellingen koppelen aan perioden, anders niet zinvol.
- Robert Vos: Aansluiting maken met wat internationaal gedaan wordt. **(Dit komt ook nog bij onderzoeksvragen aan bod)**
- Discussie over presentatie van de resultaten (Sybren, Saskia): Kies presentatie die hoort bij de doelen van de ZSM. Belangrijk om na te denken welke variatie belangrijk is voor het doel, en over welke periode je zowel achteruit als vooruit wilt kijken.
- Quirijn: Huidig gebruik. We gebruiken het o.a. als advies naar de kamer (suppletiebehoefte) voor 10 jaar vooruit, dit wordt elke 6 jaar herzien.

Aantekeningen Quirijn op flip-over



## 2 Deel 2: Onderzoeksvragen

Het tweede deel van de workshop werd besteed aan onderzoeksvragen voor de komende jaren. Voor de workshop was een lijst met mogelijke onderwerpen rondgestuurd die door Deltares waren samengesteld. Er waren additionele bijdragen van KNMI (Dewi le Bar en Sibren Drijfhout) en RWS (Annette Zijderveld).

### 2.1 Presentatie KNMI (Dewi le Bars) – Extra input voor discussie onderzoeksagenda

- Long term perspective (Walker et al., 2022) on sea level change in world sea level 0 – 2000 AC. Would be illustrative to have a similar curve for the Netherlands. E.g. when was acceleration from 0.5 – 2 mm/year.
- **Behoeftte aan een representatie van de zeespiegel(stijging) vanaf ca. 30000 jaar geleden voor Nederland.** (Rena: afstemmen met Marc Hijma, Deltares).
- KNMI fits wind influence and acceleration using GAM. Remove influence of nodal tide, wind (2 different models) leaves curve with change in sea level change. Correction for wind from 1900 on removes influence of wind over larger time than (currently) ZSM.
- **Neem windcorrectie mee in Zeespiegelmonitor over een langere tijd dan nu gedaan wordt.**
- Include sea level budget. From 1950-now plot contribution of all processes to the trend. (picture in memo).
- Visualize Sea level over time without variation of factors that contribute little to the trend, but relatively much to the year-to-year variation (wind, surge, nodal tide?)
- **Visualiseer zeespiegel waar variatie door wind, getij is uitgehaald.**
- Comparison observations and projections. Correction of projections using sea level budget. KNMI will work further on this for the coming years.
- Belangrijke meerwaarde van de samenwerking tussen KNMI en Deltares rondom de Zeespiegelstijging is de uitleg over de overschatting die in de vorige KNMI scenario's aan het licht zijn gekomen en dat deze in de volgende scenario's hersteld kunnen worden.

Ingekomen reactie Annette Zijderveld (RWS WVL, via Saskia)

- Het huidige onderzoek draait nu om de "middenstand" (gemiddelden), en niet om 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> orde effecten, zoals hoog- en laagwater, sedimenttransport, seizoensinvloeden, oceaanstromingen. De opdracht lijkt daarmee te smal.
  - o Extra duiding naar aanleiding van gesprek met Annette. Vanuit het waarschuwbureau kust (WMCN-Kust) worden de laatste jaren veranderingen van het getij gezien in de metingen. Mogelijke oorzaak hiervoor zijn veranderingen in zeespiegelstijging/klimaatverandering waaronder oceaanstromingen. Voor het doel: signaleren huidige versnelling is het dus mogelijk zo dat een andere parameter dan de middenstand meer informatie geeft.
- **→ Onderzoeksvragen: is het voldoende om naar middenstand te kijken, of is het ook nodig om naar andere indicatoren te kijken (getijcomponenten? ) om bijvoorbeeld een versnelling te detecteren. Merk op dat afgeleide indicatoren veelal ook berekend worden in het project "Kenmerkende Waarden Kust".**

### 3 Discussie over vooraf voorgestelde vragen

Om de zeespiegelmonitor goed aan te laten sluiten bij het kustbeleid maken we elk jaar een overzicht van openstaande vragen. Hierbij kijken we naar rapporten, literatuur en ook naar discussies en stukken van de tweede kamer en vragen die naar aanleiding van de Zeespiegelmonitor aan Deltares gesteld worden door het publiek. Ze zijn gegroepeerd naar thema's (vet).

### 4 Vragen vanuit Rijkswaterstaat/DGWB

#### Consistentie van methodieken

#### **Vergelijking met Satellietdata. In hoeverre stemmen de gemeten zeespiegel en -stijging overeen met satellietmetingen? Zo niet, weten we waarom?**

##### Toelichting:

- Er is behoefte aan een meer algemene beschrijving van de verschillende meettechnieken (waaronder satelliet metingen) die gebruikt kunnen worden om zeespiegelstijging te detecteren.
- Er is behoefte aan een beschrijving van de huidige strategie die we kiezen (jaargemiddelde hoofdgetijde stations) gezien de doelen.

##### Discussie:

- Wat zijn de verschillen tussen de KNMI methode en de Deltares methode voor het vaststellen van de zeespiegelstijging en een eventuele versnelling? → rapportage
- Zijn er nog aanvullende meetmethoden die nodig of wenselijk zijn om de doelen van de ZSM goed te kunnen voldoen?
- Robert Vos: Er worden nu nieuwe instrumenten geplaatst op energieverzamel punten. Als er behoefte is aan meer of betere instrumenten dan moet dat nu doorgegeven worden. Dit moet daarom voorrang krijgen in de onderzoeksagenda.

#### Ruimtelijk consistent

#### **Laten omringende landen dezelfde zeespiegel(stijging) zien? Zo niet, weten we waarom?**

##### Discussie:

- Relevant.
- Aansluiten bij projecties NIOZ (<https://www.nioz.nl/en/news/better-prediction-of-sea-level-change-with-regional-models> ?).

#### Onzekerheden verkleinen

#### **Kan de schatting van de zeespiegelstijging verbeterd worden door een betere schatting van de invloed van getij en wind door GTSM her-analyses?**

##### Toelichting:

- Hieraan wordt dit jaar al gewerkt. Vanuit een intern project (Deltares) wordt deze methodiek opgezet en geautomatiseerd voor jaarlijks gebruik in de Zeespiegelmonitor. Op dit moment wordt deze heranalyse opgezet voor jaren vanaf 1979. Deze zou kunnen worden uitgebreid naar eerdere jaren wanneer dat wenselijk is en wanneer we daar een grote verbetering mee verwachten voor het doel van de ZSM.

##### Discussie:

- Een regelmatige evaluatie is wenselijk.

## 5 Vragen uit de publieke ruimte: Kamerdiscussies en ad hoc vragen relevant voor de zeespiegelmonitor

Op basis van de parlementaire documenten over de periode 2019 – juni 2022 zijn de volgende thema's geselecteerd. Ze zijn gegroepeerd naar thema's (vet) en of ze al een keer eerder aan bod zijn gekomen of elders geadresseerd zijn (blauwe titels). De categorie "te behandelen" is input voor de zeespiegelmonitor onderzoeksagenda 2023-2025.

### Sneller dan gedacht (bias + reflectie):

**Wat was gedacht? Welke zeespiegelstijging scenario's zijn eerder afgegeven. Zat er in deze eerdere scenario's een bias?**

**Wat verwachten we (het zou kunnen dat versus we verwachten dat):**

**Er ontbreekt een kans bij scenario's. Wat verwachten we, gegeven "nu"?**

Discussie:

- DGWB/RWS: Er is nu geen wens om dit op te pakken

### Transparantie (sterke instituten):

**Zijn we voldoende transparant en onafhankelijk? Waarom zou je cijfers van ons instituut vertrouwen? Hoe kan het vertrouwen in de conclusies vergroot worden.**

Discussie:

- Transparantie is nodig in
  - o Meetmethoden
  - o Dataverwerking
  - o Ontsluiting van data en informatie (FAIR<sup>1</sup>)
  - o Modelleren
  - o Vraagarticulatie
  - o Welke doelen worden gesteld
  - o Welke onderzoeksvragen worden behandeld
- Dit is stof voor een nadere discussie en specificatie
  - o Kunnen bijv. publiekssessies hier aan bijdragen?
  - o Welke richtlijnen zijn er?
  - o Hoe goed voldoet ons werk daar aan?

### Inclusief (heel Nederland):

**Wat is de zeespiegelstijging in het Caribisch deel van Nederland?**

Discussie:

- Besloten is om de keuze van het ministerie af te wachten.

### 5.1 Elders geadresseerd:

#### Integratie:

<sup>1</sup> Findability, accessibility, interoperability, and reusability ([https://en.wikipedia.org/wiki/FAIR\\_data](https://en.wikipedia.org/wiki/FAIR_data))

Wat voor gevolgen verwachten we van de zeespiegelstijging + buien of + rivierafvoer? Welk effect hebben de Nederlandse mitigatie maatregelen op de Nederlandse zeespiegelstijging? Zeespiegelstijging + andere effecten in de toekomst valt onder Deltaprogramma. Effect van mitigatie maatregelen is PBL.

**Planologische implicaties:**

Waar kunnen we wonen als de zeespiegelstijging doorzet? Ruimtelijke ordeningsvraagstukken vallen onder PBL, Deltaprogramma.

**Bangmakerij:**

Zijn mensen bang voor een zeespiegelstijging en hebben mensen een oprechte angst of een irrationele angst? Mogelijk voorstel universiteit.

**Legal:**

Hoe sluit het gebruik van scenario's aan bij voorzorgsprincipe? Hier is de landsadvocaat mee bezig.

Korte toelichting bij punt "legal":

Het advies van de landsadvocaat over "worst-case scenario's" staat hier:

<https://www.tweedekamer.nl/downloads/document?id=b2d39226-d8f5-416d-9e86-c5b953dfc1c3&title=Staat%20%28LNV%29%20-%20advies%20Wnb-vergunning%20gaswinning%20Ternaard.pdf>

- o er mag geen twijfel bestaan over worst case scenario
- o je mag in principe niet onzekerheid op onzekerheid tellen (standpunt TNO)
- o je moet het per geval bekijken

Dit document slaat terug op:

[https://www.waddenacademie.nl/fileadmin/inhoud/pdf/01-Waddenacademie/Advies\\_Waddenacademie\\_gaswinning\\_Ternaard\\_-\\_5\\_oktober\\_2021.pdf](https://www.waddenacademie.nl/fileadmin/inhoud/pdf/01-Waddenacademie/Advies_Waddenacademie_gaswinning_Ternaard_-_5_oktober_2021.pdf)

**Procedureel:**

Onderwerpen staan dubbel op de agenda of verdwijnen. Verantwoordelijkheid kamer.

**Beoordeling:**

Is er sprake van een klimaatcrisis op basis van zeespiegelstijging? Zijn er conflicten door zeespiegelstijging? Crisis uitroepen is taak overheid/ kamer / regering. Conflicten door zeespiegel -> Water Peace Security i.s.m. Buitenlandse Zaken.

**Wadden:**

Zeespiegel voor hand aan de kraan – TNO.

## 5.2 Eerder behandeld, reeds in rapportage:

**Consistentie:**

Aansluiting tussen metingen en scenario's. Vaste periodes hanteren. Verschillende methoden opnemen.

**Context:**

Zeespiegel vs bodemdaling. Vergelijking met de wereld, Noordzee. Krijgen we een evenredig deel?

Discussie: Dit is wel een blijvend aandachtsveld. Goed om hier wel iets over op te nemen in de onderzoeksagenda. "Zie ook bovenstaande onder details - 'Definitie zeespiegelstijging -

Conceptueel uitdenken Bodemdaling en zeespiegelstijging.' Mogelijk klopt de conclusie niet die we in het rapport 2018 hebben staan. Vraag is of we nu al volgende onderbouwing hebben om deze conclusie te herformuleren.

**Metingen:**

Hoe hoog staat de zeespiegel? Hoe hard steeg de zeespiegel? Snellere updates.

**Aansluiting bij beleid:**

Waar wordt de zeespiegel voor gebruikt? Hoe zit die in de normen verwerkt?

**Oorzaken:**

Kwantificatie van oorzaken van zeespiegelstijging.

## 6 Onderwerpen uit wetenschappelijke literatuur

Er zijn bij verschillende onderdelen updates in de literatuur. Enkele voorbeelden:

- o Gebruik van satellietmetingen dichterbij de kust (binnen 30km zone)
- o Trend / versnellingsbepaling methodieken (bijv correctie voor mogelijke Topex bias, rapportage over verschillende perioden)
- o Toekennen van kansen aan scenario's
- o De oorsprong van de AMO cyclus
- o Nieuw IPCC rapport (concept)

Hier is geen discussie over geweest door tijdgebrek. Het is evident dat we de ontwikkelingen volgen en inzetten wanneer dat zinvol is.

## C.3 Producten met samenvatting over de laatste periode (2019-2022)

Zeespiegelstijging in ontwerpnormen stormvloedkeringen : inventarisatie van zeespiegelstijging in ontwerpnormen van de Oosterscheldekering en de Maeslantkering (Oerlemans et al. 2022)

Samenvatting: Doelstelling van deze studie was te inventariseren hoe zeespiegelstijging is meegenomen in het ontwerp van de Oosterscheldekering en de Maeslantkering. Het onderzoek bestond uit een bureaustudie en semigestructureerde interviews met experts die betrokken zijn geweest bij het ontwerp van de Maeslantkering en de Oosterscheldekering. In het onderzoek zijn de snelheid van zeespiegelstijging, levensduur en toeslagwaarde geïnterpreteerd. Daarbij is nadrukkelijk gekeken naar de uitgangspunten die zijn meegenomen in het ontwerp. Daarnaast is geanalyseerd of de toeslagwaarde op logische wijze uit de snelheid van de zeespiegelstijging en de levensduur volgt.

Advies kenmerkende waarden kust : overzicht zeespiegelindicatoren (Nicolai and Verkaik 2020)

Samenvatting: Rijkswaterstaat verzamelt al jaren gegevens over de waterstanden en afvoeren in ons land. Met deze gegevens kan RWS uitrekenen wat gedurende enkele tientallen jaren de representatieve waterstand en afvoer op verschillende locaties in de zee, rivieren en meren was. Deze representatieve waarden, zoals gemiddelden, hoogste en laagste waarden, over- en onderschrijdingswaarden, noemen we kenmerkende waarden. RWS berekent en publiceert iedere 10 jaar kenmerkende waarden, zowel voor het rivierengebied als voor de kustwateren. De kenmerkende waarden voor de kustwateren volgen via een berekening uit de meetgegevens van de getijstations langs de kust. Naast deze kenmerkende waarden laat Rijkswaterstaat ook andere zeespiegelgetallen uitrekenen. Twee bekende indicatoren zijn de actuele zeespiegel en de actuele trend in de zeespiegelstijging. Deltares en HKV berekenen deze indicatoren jaarlijks in de Zeespiegelmonitor. Dit rapport beantwoordt de volgende vraag: "Is er overlap tussen de kenmerkende waarden Kustwateren en de indicatoren in de Zeespiegelmonitor?". Deze vraag is beantwoord door het raadplegen van de relevante rapporten en door middel van interviews met enkele experts die betrokken zijn bij het afleiden van zeespiegelgetallen. Er blijkt inderdaad een overlap te zijn, al is die beperkt tot de indicator "gemiddelde zeestand". De totstandkoming van deze indicator blijkt te verschillen.

Methode voor visualisatie van tijdreeksen en scenario's voor zeespiegelstijging (concept versie voor discussie) (Fedor Baart, Le Bars, and Hurk 2021)

Samenvatting: Dit document geeft invulling aan het voorstel voor een nieuwe gezamenlijke presentatie van de KNMI klimaatscenario's van zeespiegelstijging en de metingen langs de Nederlandse kust (2019). In dat memo werd aanbevolen om Deltares en KNMI een nieuwe variant te laten maken van deze gezamenlijke presentatie, zodat beide instituten dezelfde figuur gebruiken. Dit memo beschrijft eerst een set afwegingen bij het maken van een gecombineerde presentatie van metingen en scenario's. Op basis van deze afwegingen is een prototype van deze figuur opgesteld.

Reproduceerbaarheid zeespiegelprojecties (Toom 2017)

Samenvatting: Veel beslissingen worden genomen op basis van de



zeespiegelmetingen, berekeningen en voorspellingen. Om die gegevens te kunnen 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). 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.

#### Reproduceerbaarheid zeespiegelmetingen (Fedor Baart 2016)

Samenvatting: Veel beslissingen worden genomen op basis van de zeespiegelmetingen, berekeningen en voorspellingen. Om die gegevens te kunnen 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). 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.

#### Reproduceerbaarheid van statistische modellen voor zeespiegelprojecties (Gelder 2017)

Samenvatting: 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 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.

#### Zeespiegelmonitor : eenduidige zeespiegelindicatoren (Nicolai, Rongen, and Baart 2016)

Samenvatting: 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?

#### Visualizing changes of the Antarctic Ice Sheet (Fedor Baart and Donchyts 2020)

Samenvatting: This memo describes a new method to visualize data using tiled videomaps. These provide a zoomable video of the current (last 5 years) of ice loss at the area that is most relevant for the Netherlands. This results in an easy-to-understand visualization of some of the processes (glacier flow, sea-ice loss, fracturing) that contribute to the current mass loss. We hope that this can contribute to

ongoing discussions on the current state sea-level rise inducing processes.

## C.4 Oudere producten relevant voor deze Zeespiegelmonitor

The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates (Fedor Baart, van Gelder, et al. 2012)

Samenvatting: Sea-level rise rates have become important drivers for policy makers dealing with the long-term protection of coastal populations. Scenario studies suggest that an acceleration in sea-level rise is imminent. The anticipated acceleration is hard to detect because of spatial and temporal variability, which consequently, have become important research topics. A known decadal-scale variation is the 18.6-year nodal cycle. Here, we show how failing to account for the nodal cycle resulted in an overestimation of Dutch sea-level rise. The nodal cycle is present across the globe with a varying phase and a median amplitude of 2.2 cm. Accounting for the nodal cycle increases the probability of detecting acceleration in the rate of sea-level rise. In an analysis of the Dutch coast, however, still no significant acceleration was found. The nodal cycle causes sea level to drop or to rise at an increased rate; therefore, accounting for it is crucial to accurately estimate regional sea-level rise.

Trends in sea-level trend analysis (Fedor Baart, Koningsveld, et al. 2012)

Samenvatting: Discussions on sea-level rise trend estimates as, for example, the one recently published in this Journal of Coastal Research, reveal different perspectives on proper methods of deriving sea-level trend estimates. This editorial discusses various methodological considerations and proposes a number of best practices for sea-level trend analysis.

Is er al een versnelde zeespiegelstijging? (Douwe Dillingh, Baart, and Ronde 2012)

Samenvatting: In dit artikel wordt ingegaan op de vraag in hoeverre Nederland rekening moet houden met een versnelde zeespiegelstijging. Voor het ontwerpen van dijken, dammen, sluizen, stormvloedkeringen e.d. moet rekening gehouden worden met versnelde zeespiegelstijging vanwege de lange levensduur, grote investering en weinig flexibiliteit. Voor zandsuppleties wordt thans uitgegaan van een relatieve zeespiegelstijging (ten opzichte van de bovenkant van het pleistoceen) van 20 cm per eeuw. De afgelopen eeuw heeft een stijgsnelheid van 19 cm per eeuw laten zien. De koppeling van deze lineaire trendlijn aan het lage KNMI'06-scenario levert een stijging van ongeveer 23 cm per eeuw voor het heden op. Omdat een significante versnelling niet is aangetoond, is het advies om het huidige uitgangspunt van 20 cm per eeuw vooralsnog te handhaven. Over circa zes jaar (cyclus van de toetsing van de primaire waterkeringen) kan opnieuw worden bekeken of het suppletieprogramma aangepast moet worden aan nieuwe inzichten. Dat is een verantwoorde strategie vanwege de grote flexibiliteit van het suppletieprogramma.

Zeespiegelmonitor 2014 : rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging

Samenvatting: Dit rapport beschrijft de methode om de huidige zeespiegel te beschrijven. De methode is veranderd ten opzichte van de vorige methode doordat het statistisch model gebruik maakt van de heranalyse van wind gegevens en rekening houdt met mogelijke niet-lineaire zeespiegelstijging. De methode combineert de voorspellingen van het statistische model op een gewogen manier met de

schattingen uit het klimaat model. Hierdoor ontstaat een schatting van de zeespiegel die van huidig tot toekomstig consistent is en die waarschijnlijker is. De analyses van de zeespiegelstijging kengetallen kunnen elk jaar oppervlakkig bekeken worden, en elke vijf jaar in detail. Daarnaast adviseert dit rapport om de zeespiegel kengetallen in een van de bestaande viewers onder te brengen om de kennis te borgen.

[Frequently asked questions \(FAQ\)](#)

## D Ad hoc vragen

Vanuit verschillende organisaties, het publieke debat en soms ook van geïnteresseerde burgers komen regelmatig vragen over de zeespiegel(stijging) bij Deltares terecht. Hieronder is een overzicht van deze vragen van de laatste 2 jaar, en het indertijd gegeven antwoord.

2021

*KNMI*

**Zijn de gegevens van zeespiegel t.o.v. NAP uit openearth-sealevel hetzelfde als die van RWS? Ik meende te zien dat jullie transformatie van rlr naar NAP niet hetzelfde is als die van PSMSL?**

- RWS levert maandelijkse metric data aan, bijvoorbeeld voor IJmuiden <sup>1</sup>. PSMSL rekent die om naar RLR (een arbitraire hoogte bijv. MSL 2007 – 7.014m voor IJmuiden, NAP – MSL = 0.064m).
- Onze RLR -> NAP is hetzelfde als wat in dit diagram staat <sup>2</sup>, zie deze omrekening in cel 4 <sup>3</sup>, daar staan die getallen 7014 en 64 in. In NL heb je het post-2005 NAP en pre-2005 NAP (allebei NAP, de methode, maar met nieuwe hoogtes voor de kuststations). We rekenen alles terug naar post-2005 NAP, zodat de data vergelijkbaar zijn. In de metric reeks zijn de data tot 2005 t.o.v. een andere NAP hoogte als na 2005. Vandaar dat we zo ingewikkeld doen. Er staat hier nog een check <sup>4</sup>.

---

**Wij willen graag automatiseren. Dat lukt niet helemaal met psmsl data (de relatie tussen rlr en NAP kan veranderen; updates van de data zijn er niet aan het begin van een nieuw jaar). Weet jij misschien of RWS zelf ook correcte data van zeestanden t.o.v. NAP ergens online heeft staan?**

- RWS heeft de gegevens niet online staan. Je kan wel de dagelijkse data uit de zogenaamde data distributielaag lezen, maar dan heb je nog geen jaargemiddelden (en soms deels niet gevalideerde data, en soms ontbreekt er wat, en het is langzaam en instabiel). Je kan ook uit Matroos data opvragen, die heeft geen api problemen maar is niet gevalideerd. Ik vraag nu elk jaar of RWS data aanlevert aan PSMSL. Die data zijn vaak rond september beschikbaar. Er is wel een plan om dit jaar wat kustgerelateerde indicatoren/data via de RWS site te ontsluiten. Daar zit ook nog een validatie stap tussen. Die doen ze meestal in juni van elk jaar.
- De PSMSL past ook af en toe hun verticale RLR niveau aan. Dan moet je ook weer alles opnieuw omrekenen. Dus dat moet je elke keer checken als je de RLR data gebruikt. Je kan dan beter nog de metric data gebruiken en die zelf omrekenen naar post-2005 NAP. Die kan je wel als constant veronderstellen (dan hoef je alleen de data voor 2005 aan te passen met een constante per station). Daar moet je wel jaargemiddelde uit uitrekenen (even checken voor consistentie wat betreft aantal dagen per maand en schrikeldagen, etc. . . ).

---

<sup>1</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/met.monthly.data/32.metadata>

<sup>2</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/rlr.diagrams/32.php>

<sup>3</sup> <https://github.com/openearth/sealevel/blob/master/notebooks/dutch-sea-level-monitor.ipynb>

<sup>4</sup> <https://github.com/openearth/sealevel/blob/master/notebooks/validation/metric-vs-rlr.ipynb>

- Gegeven de huidige toestand heb ik zelf in ieder geval besloten om het niet te automatiseren. Ik heb het wel geautomatiseerd in de zin van dat ik de data met een script opvraag en de grafieken allemaal uitreken. Maar ik check de data wel nog elke keer handmatig voor ik ze online zet.
- Wij exporteren de reeksen ook op zenodo (reeksen staan in deltares/results)<sup>5</sup>. Die worden veel gebruikt, bijvoorbeeld in het compendium voor de leefomgeving<sup>6</sup>. Daar overleg ik ook dit soort details mee, maar dan met PBL. Je zou ook kunnen kijken of je daar wat mee kan integreren, want zij herpubliceren die cijfers ook al.

---

**Hoe linken jullie de globale zeespiegel met de Nederlandse t.o.v. NAP? Dit is natuurlijk arbitrair en alleen van belang voor het plaatje. Wij denken erover om de gemiddelden over de laatste 3 volledige decaden aan elkaar gelijk te maken (overeenkomend met de meest recente klimaat-normaal). Zou jij dit ook zo doen of heb je misschien een beter idee?**

- Het is nogal arbitrair omdat globale trends geen verticaal referentie systeem hebben. Satellietmetingen worden doorgaans als anomalieën (t.o.v. een referentie jaar of referentie periode) gerapporteerd. Als je verticale referentie systemen wil matchen doe je dat vaak geodetisch (op basis van een geoid) of op basis van Lowest Astronomical Tide kaarten. Maar omdat satelliet producten die doorgaans niet hebben, kan dat niet. Dus dan zit je vast aan het kiezen van een referentieperiode. Vaak wordt satellietdata t.o.v. 1993 uitgedrukt omdat de metingen toen begonnen. De zeespiegel stond wereldwijd toen 5mm lager door de uitbarsting van de Pinatubo<sup>7</sup>, dat maakt het ook nog eens ongelukkig om naar die globale reeks te kijken over die tijdsperiode. Ook is er discussie in de literatuur over de correctheid van de atmosferische correcties in het begin van de reeks. Sommige doen nu voor beide een correctie waardoor de zeespiegel wat minder snel stijgt, maar wel meer versnelt, waardoor je op een hogere actuele zeespiegelstijging uitkomt (~4.0mm/yr ipv 3.2). Daar staat niet iedereen achter. NOAA doet geloof ik geen correcties en die schatten de globale zeespiegel nu op 2.9mm/yr (NOAA website is offline dus ik kan even geen bron geven). Dus je moet ook nog even goed vermelden welke reeks je precies gebruikt en welke correcties daar wel en niet inzitten en wat het effect daarvan is.
- In de meeste (behalve die van NOAA) reeksen van satellieten zit ook nog een GIA correctie. Die moet je er eigenlijk weer vanaf halen (~0.3mm / year voor globaal) als je het met de stand aan de kust vergelijkt. De bodem onder de oceaan is gezakt, daar wordt 0.3mm per jaar voor bij de globale zeespiegel opgeteld, maar die zie je niet aan de kust. Datzelfde geldt voor bodemdaling onder het land (~0.45mm/yr aan de kust), die zit niet in de globale zeespiegelstijging.
- Het belangrijkste om op te letten is hoe mensen de data interpreteren. Als je het einde van de reeks gelijk trekt, dan groeien de twee reeksen per definitie naar elkaar toe. Als je ze aan het begin aan elkaar knoopt, groeien ze uit elkaar. Het is dezelfde data, maar de duiding die men er aan geeft is tegenovergesteld.
- Ik zet ze normaal niet in 1 plaatje. Als ik het zou doen, dan zou ik ze op 1993 uitlijnen, vanwege de definitie van de satelliet anomalieën, en omdat klimaatscenario's vaak rond die tijd beginnen. Ik heb nog nooit een gezamenlijke figuur gezien van getij metingen en satellietmetingen waarbij alle details klopten en de figuur goed werd geduid en begrepen.

<sup>5</sup><https://zenodo.org/record/4609775>

<sup>6</sup><https://www.clo.nl/indicatoren/nl0229-zeespiegelstand-nederland-en-mondiaal>

<sup>7</sup><https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16267551/>

- We hebben ook nog samen met KNMI gewerkt aan gezamenlijke figuren. Die kan je er ook nog even bij pakken ter referentie. (later toegevoegd: De gezamenlijke figuren zijn work-in-progress <sup>8</sup>)

*Pers*

**Waarom was er in de tweede helft van de jaren vijftig opeens zoveel aandacht voor de stijgende zeespiegel, zoals blijkt uit de twee links die je me stuurde? Had het iets te maken met de start van de CO<sub>2</sub>-metingen op Mauna Loa?**

Dat citaat kwam uit het Nieuwsblad van het Noorden, 1958-08-09, pagina 3 rechts bovenaan.

Hier de link via de kb naar delpher. Als het goed is, is dat een publieke link <sup>9</sup>.

Ook in die tijd waren er al zorgen over de versnelde zeespiegelstijging (ze hadden het toen over rijzing ipv stijging en koolzuurgas ipv CO<sub>2</sub>), bijv: Nijlpaarden in West Europa? <sup>10</sup>

*Publiek*

**Inmiddels heb ik mij verder in de materie verdiept, nadat ik mij na het lezen van “Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea” (Steffelbauer et al 2022) afvroeg of en hoe de getijdestations hun meetreeksen corrigeren voor bodemdaling door mijnbouwactiviteiten. Die gegevens worden immers door AGE via NLOG beschikbaar gesteld. Bovendien is een trendwijziging relevant voor het hand-aan-de-kraan principe. Ik las inmiddels het HKVrapport (2021), op basis waarvan ik mij inmiddels afvraag of de gemeten trendwijziging niet binnen de meetfout valt, danwel een artefact is van het niet goed corrigeren voor de invloed van bodemdaling door mijnbouw op de gebruikte meetreeksen. Kan de waargenomen trendwijziging niet ook gewoon een artefact zijn van de mate van nauwkeurigheid van de correctie voor het nodale getij? [ingekort]**

Naast de bekende oorzaken van een knik (vulkaanuitbarsting, 1991, oostenwind 1996, nodaal getij) lijkt er de laatste jaren ook een administratieve fout in de bodemdaling te zijn opgetreden. Dit kwam naar voren door de individuele stations met het gemiddelde en hoofd principale component te vergelijken. Het lijkt erop dat bodemdaling in ieder geval Delfzijl niet goed doorgevoerd is. Delfzijl is in 1970 “losgekoppeld” van het NAP, in het HKV rapport staat dat in 3.2.3 beschreven. Daar zou het NAP vlak doorgetrokken moeten worden van buiten de bodemdalingskom naar het peilstation. Het zou kunnen zijn dat dat een aantal jaren niet gebeurd is. Rijkswaterstaat is dit nu aan het uitzoeken. Zullen we dit onderwerp doorspreken, zodra we een terugkoppeling van RWS hebben? Ik verwacht die de komende weken. We zijn nu bezig om een nieuwe update van de zeespiegelmonitor rapportage te prepareren. Die staat gepland voor eind van het jaar. Een korte update van mijn kant. We hebben deze situatie besproken met Rijkswaterstaat. Ze gaan een notitie opstellen waarin twee discrepanties behandeld worden. - Er zijn in het verleden voor sommige stations meerdere reeksen ingevoerd door verschillende organisatieonderdelen. Daardoor kon het voorkomen dat niet gevalideerde of gecorrigeerde data de gecorrigeerde data overschreef. - De aansluiting van het NAP in het getijstation van Delfzijl is een aantal jaar wel gemeten maar niet doorgevoerd. Voor beide aspecten komt mogelijk een

<sup>8</sup><https://deltares.shinyapps.io/sealevelFlexDashboard/>

<sup>9</sup><https://www.delpher.nl/nl/kranten/view?coll=ddd&identificer=ddd:010677357:mpeg21>

<sup>10</sup><https://www.delpher.nl/nl/kranten/view?coll=ddd&identificer=MMKB19:000273027:mpeg21>

correctie. Rijkswaterstaat is waarschijnlijk niet voor het verschijnen van ons rapport klaar met deze notitie. Daarom rekenen we voorlopig met de data zoals die nu zijn ontsloten. Wel nemen we in ons rapport een sectie op over de mogelijke consequenties van deze aanpassingen. Ook laten we een methode zien waarmee dit soort “discontinuïteiten” gevonden kunnen worden.

---

**In uw samenvatting van de zeespiegelmonitor 2018 lees ik “Een belangrijke factor waardoor de zeespiegelstijging in Nederland lager is dan wereldwijd, is dat door het zwaartekrachteffect het ijs dat smelt en afkalft op Groenland niet bij Nederland terechtkomt. Nu was ik juist zo gecharmeerd van uw eerdere feitelijke mededeling over de centimeters grote zeespiegeldaling in 2018.” Fedor Baart (kustexpert Deltares): “Wat verder opviel is dat in het jaar 2018 de gemiddelde zeespiegel langs de Nederlandse kust met 7,2 cm is gedaald ten opzichte van de gemiddelde stand in 2017. Dat is de grootste daling sinds 1996.” Die uitspraak over Groenlandse ijssmelt staat qua feitelijke bij mij wat lager in achting. Of, anders gezegd, ik bespeur hier een zeker verhoogd (ideologisch) glazen-bol-gehalte. Mag ik weten hoe en waarom en door wie die passage erin is gefietst?**

Zowel de eerste passage als de tweede passage heb ik opgesteld, in samenspraak met onze communicatie afdeling en met Rijkswaterstaat. Beide zinnen hebben betrekking op de zeespiegelmonitor, te vinden in onderstaande link [<https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/Zeespiegelmonitor-2018-final.pdf>]. De eerste zin slaat terug op sectie 2.3.1, daarin wordt één van de factoren die invloed heeft op de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust beschreven. In sectie 7.1 wordt deze factor in de context van andere factoren besproken.

---

**Gister kreeg ik een folder van Forum voor Democratie in de bus met daarin een artikel over de klimaatcrisis (zie bijlage). Nu gaat het mij niet direct om de politieke standpunten van de partij maar om de bronverwijzing. Men verwijst namelijk naar een onderzoek van u waarin een toekomstvoorspelling van de zeespiegelstijging in Nederland is te zien alsmede de verwachting van activisten over die toekomst. Ik kan deze grafiek niet vinden op de website van het consortium. Ik kan wel een andere grafiek vinden. Hierin is echter geen toekomstvoorspelling van het consortium of van activisten opgenomen.**

Toelichting op de antwoorden: De meetgegevens uit het compendium voor de leefomgeving komen uit de zeespiegelmonitor <sup>11</sup> waar Deltares hoofdauteur van is. Wij trekken de metingen niet door naar de verre toekomst. We adviseren om de huidige zeespiegelstijging (de trend) te gebruiken voor toepassingen tot maximaal 15 jaar vooruit. We hebben aangestipt dat de zeespiegelscenario's voor Nederland een overschatting laten zien ten opzichte van de huidige metingen <sup>12</sup>, zie onze FAQ's voor een nadere duiding <sup>13 14</sup>. Het hoogste scenario waar we mee rekenen is terug te

---

<sup>11</sup> <https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/Zeespiegelmonitor-2018-final.pdf>

<sup>12</sup> <https://www.deltares.nl/nl/nieuws/nauwkeuriger-inzicht-huidige-zeespiegel-langs-de-nederlandse-kust/>

<sup>13</sup> <https://www.deltares.nl/app/uploads/2018/09/QenAs-gevolgen-versnelde-zeespiegelstijging.pdf>

<sup>14</sup> <https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/faq-zeespiegelmonitor-2018-.pdf>



vinden in <sup>15</sup>. Daar rekenen we met een bovengrens van iets boven de 3m. Het zou kunnen zijn dat dat de bron is van de “activisten” curve (daar lees ik iets boven de 3.5m af, dat is iets te hoog). Of dit daadwerkelijk de bronnen zijn kunt u het beste bij Forum voor Democratie verifiëren. Naar beide bronnen wordt in het compendium voor de leefomgeving in ieder geval verwezen <sup>16</sup>.

---

**Is de aangedragen grafiek in de folder wel de uwe?**

- Nee, maar wel deels gebaseerd op onze data.
- 

**Zo nee, hoe staat u dan tegenover het gebruik van de grafiek op deze manier onder uw naam?**

- We zijn een open kennisinstituut. Het doel van de zeespiegelmonitor is om gebruikt te worden in het kustbeleid. We publiceren ook de gegevens en de computercode die we gebruiken in ons rapport <sup>17</sup>. Het doel om deze onderliggende data te publiceren is dat het iedereen vrij staat om deze data te hergebruiken.
- 

**Is het volgens u (indien de grafiek uit de folder wel klopt) een terechte aanwijzing dat we niet in een klimaatcrisis zitten, zoals het artikel beweerd?**

- Je kan vanuit het perspectief van de huidige Nederlandse zeespiegelstijging niet tot een conclusie komen of we wel of niet in een klimaatcrisis zitten.
- 

**Ik ben me aan het afvragen hoe men de stijging van DE zeespiegel meet of berekent. Nu heb ik op : KNMI - Zeespiegelstijging gekeken en daar allerlei tegenstrijdige zaken gezien en gelezen. En ook gehoord. Er staat daar geschreven dat de zeespiegel met ca 1,5mm per jaar stijgt. Er is een filmpje waarin wordt gezegd dat de zeespiegel mogelijk met een meter of meer zou kunnen stijgen... voor het jaar 2100. Nu heb ik een rekenmachientje en als ik intik 2x100 dan heb ik 200 mm zijnde 20 cm... Dat is dan een heel verschil met datgene wat er in dat filmpje wordt beweerd. Er is een factor 5 in het geding. Nu staat er te lezen dat het zeenivo niet vlak is. En dat er bergen en dalen zijn tgv div zaken, wind , magnetisme draaiing vd aarde etc etc...**

- U tipt aan dat de zeespiegel met een factor 5 harder zou moeten stijgen om 1 meter zeespiegelstijging in 2100 te kunnen bereiken. Er zit inderdaad een groot verschil tussen wat we nu observeren en voor in de toekomst verwachten. U kunt dit bijvoorbeeld terugzien in figuur 2 (rechter figuur) in het rapport van mijn collega

---

<sup>15</sup><https://www.deltaprogramma.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2018/09/18/dp2019-b-rapport-deltares/DP2019+B+Rapport+Deltares.pdf>

<sup>16</sup><https://www.clo.nl/indicatoren/nl0229-zeespiegelstand-nederland-en-mondiaal>

<sup>17</sup><http://doi.org/10.5281/zenodo.4298787>



Haasnoot [<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/publicaties/2018/09/18/dp2019-b-rapport-deltares>]. De snelheden in de scenario's waarmee gerekend wordt voor het jaar 2100 lopen op tot 124mm per jaar. Dus tot ruim een factor 80 hoger dan de huidige 1.5mm per jaar (absolute) zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

---

**Er wordt heeeel secuur gemeten... dat doet men oa aan de kust met een stok en daarop een meter bevestigd. Ik heb meet en regeltechniek gestudeerd en van daaruit WEET ik dat deze methode totaal onbetrouwbaar is. Alleen al de parallactische fout is bij deze meting niet te verwaarlozen.. Bovendien zakt die stok de grond in. Met de satelliet meten. Er is eb en vloed er is wind er is magnetisme. De hoogte wordt, door satellieten, gemeten, zo staat er te lezen, t.o.v. het middelpunt der aarde. Heuh hoe weet die satelliet op de mm af waar het middelpunt der aarde is... Zeker er staat bij dat de satellietmetingen onnauwkeurig zijn, maar toch... Evenzo goed wordt er vanuit gegaan dat de zeespiegel zomaar 1 meter kan stijgen, terwijl het absoluut nergens onderbouwd wordt. Er is een kaart waar de oceaan is ingekleurd en waar je op zou kunnen zien dat de oceaan in z'n totaliteit niet stijgt of nauwelijks. Zeker die kaart is maar een kaart en is geen zekerheid. Maar toch.**

- U geeft aan dat de op de KNMI site staat aangegeven dat er wordt gemeten aan de kust met een peilstok. Dat is niet juist. Ik zal de KNMI er nog eens op wijzen dat dit nog steeds fout staat. Ik wees ze hier begin vorig jaar ook op. De metingen in de hoofdstations vinden plaats met een nauwkeuriger instrument. In vijf van de zes hoofdstations wordt gemeten met een zogenaamde digital niveau meter. Aan deze meter is een vlotter gemonteerd die meebeweegt met het wateroppervlak. In IJmuiden wordt sinds 2020 gemeten met een digitale radarmeting. Deze radar staat gericht op het wateroppervlak en meet zo ook de variatie en uiteindelijk de gemiddelde hoogte van het wateroppervlak. Satellietmetingen (ook met radar) zijn minder geschikt voor toepassingen direct aan de kust maar geven wel een goede dekking van de hele oceaan. Satellietmetingen zijn wat onnauwkeuriger dan metingen met vlotters en dan metingen met radar dicht bij het wateroppervlak. Op zee wordt nog wel eens gemeten met een zogenaamde stappenbaken, waar langs een peilstok om de 10cm elektroden zijn gemonteerd. Deze meetopstelling is goed bestand tegen ruwe omgevingen. Maar die metingen gebruiken we niet voor de zeespiegel langs de kust.
- U noemt ook nog dat de stok inzakt. De hoogte van het meetinstrument wordt jaarlijks afgestemd met de dichtstbijzijnde NAP 0-paal. Daardoor zijn de metingen niet gevoelig voor lokale verzakkingen van het peilstation.

---

**Vreemd , vreemd allemaal.. zeker als je bedenkt dat 'heuse'wetenschappers voor enkele jaren op de tv kwamen en schreven in gerenommeerde kranten als NRC, Trouw dat door het smelten van het Noorpoolijs de zeespiegel zou stijgen, terwijl wij op de 2e klas van het voortgezet onderwijs leerden en ZAGEN dat het nivo van water met daarin ijs zou dalen als het ijs smelt. En sterker dat het niveau DAALDE omdat het water afkoelde**

- U stipt ook nog het water dalen door afkoeling aan. Dit hebben we een paar jaar terug nog aangestipt door een vraag te maken voor de wetenschapsquiz (@

1:20:30 in [[https://www.npostart.nl/de-nationale-wetenschapsquiz-2017/26-12-2017/VPWON\\_1282245](https://www.npostart.nl/de-nationale-wetenschapsquiz-2017/26-12-2017/VPWON_1282245)]. We maken ons in Nederland overigens niet zo zeer zorgen voor het Noordpoolijs, maar vooral voor het ijs dat afsmelt van Antarctica. Voor Nederland is vooral het gebied Dronning Maud Land van belang, van elk cm zeespiegel equivalent die daar afsmelt krijgt Nederland er 1.35 cm. Gelukkig groeit de ijsmassa daar op dit moment aan. Wel kalft het ijs snel af van de Thwaites gletsjer en omgeving. Dat is voor de Nederland net zo vervelend als voor de rest van de wereld.

**2020**

*Rijkswaterstaat*

*Verzoek om figuren en verklarende tekst met betrekking tot zeespiegelstijging in de Eems-Dollard.*

Tekst en figuren samengesteld in [online korte memo](#)

---

### **Is een knikpunt rond 1993 het gevolg van een versnelling of het gevolg van een lage gemiddelde zeestand in de jaren er voor?**

Begin jaren 1990 stond de zeespiegel wat lager. Dit wordt voor een deel toegeschreven aan de uitbarsting van Mount Pinatubo (bijv. "the eruption of Mount Pinatubo in 1991 caused a decrease in GMSL"<sup>18</sup>). Daarnaast was er aan de Nederlandse kust een negatieve opzet. Deze negatieve surge kunnen we deels "corrigeren" met ons huidige windmodel. Met het GTSM model (globale Delft3D FM model) wordt het afwijkende jaar nog iets beter meegenomen (zie bijgevoegde figuur uit de online rekendocumenten van het rapport).

Er is dus een knikpunt te vinden. Deze duiden we vooralsnog als een ingehaalde achterstand, en niet als een versnelling.

---

### **Waarom zou er een knikpunt zijn, immers ZSS werd (zeker in de jaren 90) gedreven door uitzetten van de oceanen. Dat is een geleidelijk proces en veroorzaakt geen knikpunten.**

Het effect is wat lastig te reconstrueren. De uitbarsting vond net voor het "satellietijdperk" plaats. Ik zag wel dat er een nieuw scenario in de CMIP6 scenario's zit, speciaal voor deze uitbarsting. In <sup>19</sup> schrijven ze 5 tot 7 mm zeespiegeldaling toe aan de afkoeling van de oceanen.

De Zeespiegelmonitor geeft ook een mogelijk knikpunt in 1993-1994, alleen is die beoordeeld als niet beter de trend beschrijvend dan gewoon een lineaire trend. Daarmee blijft de vraag, hoe relevant is een mogelijke trendbreuk?

---

<sup>18</sup><https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1717312115>

<sup>19</sup><https://www.nature.com/articles/srep31245>

Ik bekijk het vooral absoluut. Hoe hoog staat de zeespiegel dit jaar, met en zonder knik. Als we het model met knikpunt hanteren, beginnen we voor 1994 1 cm lager en schatten we voor 2018 de zeespiegel 1 cm hoger. Ik vind het relevant genoeg om te noemen. Daarom staat het ook in het rapport. Daarnaast is het relevant om een goede vergelijking te kunnen maken met satellietmetingen over dezelfde tijdspanne.

*TU Eindhoven*

**I write to you because I have some doubts concerning some sea level data. As you probably know, I worked in the past with monthly averaged PSMSL for some of the tidal gauges in the the Netherlands. However, for comparison with simulations and other analysis we use the sea level data from Rijkswaterstaat which uses NAP as the references. My questions are: how can I compare these data? Is it possible to compute sea level trends from Rijkswaterstaat data? I know about your report that NAP was shifted in 2005. Has it been shifted again after that?**

First regarding your question “how can I compare these data?”. The comparison between the NAP and the PSMSL data is stored at the PSMSL in the form of a chart. You can see these charts per station, for example for [IJmuiden](#)

The adjusted measurements are what the PSMSL refers to as the Revised Local Reference level. The original NAP data is what they call “metric”. For people with an imperial background, “metric” sounds like something that should be converted. You can see details on how I use these parameters in these notebooks<sup>20</sup>. Please note that the PSMSL sometimes changes these parameters (in particular the number 7014 in the figure above) without a notice, so you have to check the parameters now and then.

Regarding your question “Is it possible to compute sea level trends from Rijkswaterstaat data?”. You can compute trends with and without this correction (on the metric data and on the rlr data from psmsl). But PSMSL advises to use the RLR data. If you compute the trend on the metric dataset a small part of your trend is due to a change in the vertical reference level. I also compute relative to RLR, but compute it back to post 2005 NAP, so that it can be compared with the latest measurements.

There was no shift after 2005. The 2004 shift is described here<sup>21</sup>. We compute the results back to the “>=2005 NAP”. It’s both NAP, but a different instance.

*Ministerie*

**Er is nav voortgangsrapportage HWBP een kamervraag binnengekomen:**

- **Kunt u aangeven met hoeveel millimeter de zeespiegel aan de Nederlandse kusten in 2019 is gestegen?**
- **Al googlend kom ik de zeespiegelmonitor 2019 nog niet tegen. RWS coördineert en moet op woensdag ambtelijk akkoord voorstel aanleveren. Dus fijn als we dit uiterlijk dinsdagochtend helder hebben.. Is dat haalbaar?**

De meetgegevens voor zeespiegel die we op dit moment tot onze beschikking hebben komen niet door ons validatieproces, waardoor we geen definitieve uitspraak kunnen doen over de zeespiegelstijging in 2019. De oorzaak hiervan is dat de zeespiegel data over 2019 nog hiaten vertoont. Dit heeft te maken met nog uit te voeren RWS

<sup>20</sup>[https://github.com/openearth/sealevel/tree/master/notebooks/\(dutch-sealevel](https://github.com/openearth/sealevel/tree/master/notebooks/(dutch-sealevel)

<sup>21</sup><http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/57206/agi-gap-04-004.pdf>

validatieprocedures, Normaal gesproken doen wij onze validatie in september, als alle RWS validaties zeker gedaan zijn. Deze vraag heeft dit proces versneld, met negatief resultaat. (Deze vraag is een paar weken later wel beantwoord, na opnieuw downloaden en controleren van de RWS meetdata uit de datadistributielaag.)

*KNMI*

**Kan 1 van jullie mij adviseren waar ik hoogfrequente tide gauge data van nv Harlingen kan krijgen. Ik wil graag het getijdesignaal isoleren, checken of het naar 0 middelt (wsch niet) en indien niet in hoeverre dit verandert in de tijd. De traditionele websites/links (zie hieronder) geven problemen.**

De waterbase API is uitgezet vorig jaar en de nieuwe Digitale Distributie Laag API heeft wat "uitdagingen". De nieuwe api (vervangt waterbase) is hier beschreven: <https://www.rijkswaterstaat.nl/rws/opendata/DistributielaagWebservices-SUM-2v7.pdf>

Deltares heeft, om het leven wat makkelijker te maken, een python api en een R api gemaakt om de data uit te lezen. <https://github.com/openearth/ddlpy/> (python)  
<https://github.com/wstolte/rwsapi> (R)

Mocht je niet geïnteresseerd zijn in de data van de afgelopen twee jaar dan kan je ook hier de netCDF's met de historie tot 2018 te downloaden: [http://opendap.deltares.nl/thredds/catalog/opendap/rijkswaterstaat/waterbase/27\\_Waterhoogte\\_in\\_cm\\_t.o.v.\\_normaal\\_amsterdams\\_peil\\_in\\_oppervlaktewater/nc/catalog.html](http://opendap.deltares.nl/thredds/catalog/opendap/rijkswaterstaat/waterbase/27_Waterhoogte_in_cm_t.o.v._normaal_amsterdams_peil_in_oppervlaktewater/nc/catalog.html)

Ik heb RWS geadviseerd om de hoogfrequente data ook aan te leveren aan deze service, maar dat is nog niet gelukt: <http://uhslc.soest.hawaii.edu/thredds/catalog.html>

De actuele data zit wel al in de tussenstap, in het IOC, maar daar is volgens mij geen archief en de maand/jaar validaties worden niet met terugwerkende kracht doorgevoerd: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=harl>

Je hebt ook nog een ander pad om de data op te vragen, via het matroos archief. Volgens mij mag het KNMI daar ook bij. Daar kan je ook metingen en forecasts downloaden. Dan kan je ook je eigen getijanalyse vergelijken met wat RWS produceert op basis van getijsys. Los daarvan heeft KNMI volgens mij ook nog een eigen SQL database met een archief van (WAQUA, SIMONA, Delft3D?) forecasts en daarbij ook opgetreden waterstanden. Ik heb daar vroeger wel eens een extract uit gekregen.

De getijanalyse komt nogal nauw. We (Deltaresmedewerkers) hebben een paar jaar geleden een vergelijking gemaakt tussen verschillende getijsoftware (t-tide, tappy, getijsys, delft3d-tide (gebaseerd op Ejo Schrama's code geloof ik). Daar bleek de getijanalyse van getijsys (die al sinds de jaren 1990 niet meer actief ontwikkeld wordt) het meest accuraat (analyse in jaar 0, vergeleken met opgetreden amplitudes in jaar +1 +5). Dat was wel jammer omdat die nog wat functionele en onderhoudsuitdagingen heeft (fortran 77 code, kan niet omgaan met wisselingen van meetfrequenties, etc. . .)

Bij getijanalyse moet je opletten hoeveel jaar je analyseert (gebruikelijk met 1 jaar), maar dan kan je niet goed met knoopfactoren rekenen (daarvoor heb je 19 jaar nodig). Je kan ook kiezen of je zeespiegel als constante of als trend meerekent, dat maakt voor de toepassing die je noemt ook veel uit, als je bijvoorbeeld een storm hebt aan het begin van het jaar. Ik heb nog wel een voorbeeld staan van een eenvoudige

getijanalyse<sup>22</sup> die we gebruiken om naar trends in M2 amplitude te kijken. Daar zie je ook dat niet elk jaar een goede oplossing geeft omdat er vroeger nog geen “opvul” routine meeliep. Veel getijpakketten kunnen niet omgaan met missing data of niet-equidistante tijdstappen. Onderstaande analyse is met utide gemaakt (python versie van Eric Firing, Filipe Fernandez), er is ook een matlab versie. Data voor 1970 gaf problemen. Waarschijnlijk omdat er toen missings in zaten, maar het kan ook zijn dat utide een aanname heeft over de epoch. Sommige getijsoftware (bijv. t-tide waar utide op gebaseerd is) werkt niet voor 1970-01-01 omdat dat het unix jaar 0 is (een soort millennium bug).

*Pers*

**Als wetenschapsjournalist ben ik nu bezig met een stuk voor Trouw over de zeespiegel die bij ons voor de deur minder hard stijgt dan mondiaal. Ik ben op zoek naar de jongste getallen op dat gebied (jonger dan de monitor van Deltares uit 2018). Is er al iets bekend over de waterstanden in de Waddenzee van de afgelopen zomer met relatief veel oostenwind? En heeft de wind ook een meetbaar effect op de stand van de Noordzee?**

We hebben vooralsnog alleen voorlopige cijfers. Juist in de zomer waren er nogal wat missings bij Den Helder (in vorige jaren kwam dat door mosselen in de buis die door de dijk loopt). Daarom zou ik wat huiverig zijn om specifieke cijfers voor de Wadden te delen. Julie leveren de definitieve cijfers altijd in de zomer aan bij PSMSL. Dat is dit jaar nog niet gebeurd Zie bijvoorbeeld IJmuiden<sup>23</sup> (data is nog tot 2018).

---

**Ik ben momenteel bezig met een achtergrondartikel over zeespiegelstijging in combinatie met het verzakken van steden door hun eigen gewicht, n.a.v. het artikel onlangs in AGU Advances. Naar aanleiding hiervan zou ik u graag wat vragen willen stellen over de Nederlandse situatie. De zeespiegel is voor Nederlandse kust de afgelopen 128 jaar met 1,86 mm per jaar (18,6 cm per eeuw) gestegen en de stijging is niet versneld, rapporteerde Deltares enkele jaren terug. Volgens IPCC versnelt de zeespiegelstijging echter wel, en is deze 4 mm per jaar. Hoe verhouden deze op het oog tegenstrijdige cijfers zich tot elkaar?**

Het belangrijkste is om dezelfde periode en gebied te vergelijken. Langs de Nederlandse kust hebben we nauwkeurige metingen sinds 1890, dus daar kijken we wat verder terug. We meten de zeespiegel pas globaal dekkend sinds 1992. De IPCC rapporteert in zijn laatste SROCC rapport 3.2 mm per jaar over de periode 1993–2015 en 3.6 mm over de periode 2006–2015. Dit gaat over de globale zeespiegelstijging (op een klein stukje Noordpool na). Als we aan de Nederlandse kust kijken zien we minder zeespiegelstijging. Dat heeft een aantal oorzaken. We hebben de periode sinds 1993 met Nederland vergeleken. Dan vallen een aantal verschillen op.

- Waar gaat het water naar toe? Nederland ligt gunstig. Het afgesmolten ijs verdeelt zich niet gelijkmatig. Nederland krijgt minder dan een evenredig deel. Vooral van Groenland krijgen we minder dan gemiddeld. Van de plek waar het in Antarctica nu in het hardste afkalft, rond de Thwaites Gletsjer, krijgen we een evenredig deel.
- Welke bodemveranderingen neem je mee? In de 3.2mm per jaar zit voor een deel een correctie voor de verdieping van de oceaan (omdat massa zich verplaatst naar

---

<sup>22</sup><https://github.com/openearth/sealevel/blob/master/notebooks/analysis/tide/tidal-trends.ipynb>

<sup>23</sup><https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/32.php>

plekken waar ijs is verdwenen). Aan de kusten zie je de zeespiegel maar gemiddeld met 2.9mm per jaar stijgen over de periode 1993-2015. Daar is de bodemdaling aan de kust niet in meegenomen. In de Nederlandse metingen zit nog een deel (0.45mm/jaar) bodemdaling. Onder de kust bij Delfzijl is de bodemdaling nog groter, maar die rekenen we apart mee.

- De trend is nogal gevoelig voor het beginjaar. In 1991 was bijvoorbeeld net de Pinatubo uitgebarsten. Daardoor koelde de wereld wat af en stond de zeespiegel wat lager. In Nederland verbinden we de lijn voor 1993 met de metingen daarvoor. Dat maakt de zeespiegelstijging iets robuuster.

Merk op dat de Nederlandse zeespiegelstijgingstrend dus duidelijk afwijkt van de globale. Dat is iets wat je over de hele wereld ziet, bijvoorbeeld in Zweden, daar daalt de zeespiegel. De huidige globale zeespiegelstijging zegt niet zo veel over wat er aan een stukje kust gebeurt.

*Publiek*

**I am writing you based on a recommendation of Laurens de Haan. His 1990 paper *Fighting the Archenemy with Mathematics*, was the basis for my question for him. The references to his paper include one for Gottschalk and his collation of six centuries of North Sea storm surges published in three volumes beginning in 1971. However, the recalibration of the Dutch dyke and levee system to a 1 in 10,000 year event after the 1953 disaster leveraged a different, earlier information source. For instance, I used to have in my possession a paper published in the early 1960s which described this first Delta project. This paper stated that it used a 400 year record for its block maxima EVT model, an obviously earlier data source than Gottschalk's. With your permission, I would like to ask you the same question I had for Dr de Haan. Can you point me to the source and data for this earlier 400 year of maxima for North Sea storm surges?**

According to the records that I have, the daily recording of tide gauges in the Netherlands started in 1700 in Amsterdam (not quite 400 years). Most of the return period estimates of the 1953 storm that were published in the 1960's, of which I am aware of, refer back to the work of Wemelsfelder. Wemelsfelder used data from 1880 and later through 1950's to estimate the return period of the 1953 storm (estimated at ~400 years). I am not aware of any studies that use the data since 1700 (or older) for extreme value/annual maxima estimates. I would be interested though, so please let me know if you do find the title of the paper which mentions that the 400 year data source.

We collected information on the older records and stored them in the PSMSL archive <sup>24</sup>. Unfortunately these records don't have the old daily/hourly/high/low tide records. Only annual mean and mid-levels were kept. This makes these records unusable for extreme value statistics. We did reconstruct the old storm surge water levels for that purpose (based on a wide variety information collected by Gottschalk, Buisman and on old paintings for the storms of 1741, 1776) in <sup>25</sup>.

We have higher temporal resolution data (hourly – minutely), with known properties of

---

<sup>24</sup> [https://www.psmsl.org/data/longrecords/ancill\\_rep.htm](https://www.psmsl.org/data/longrecords/ancill_rep.htm)

<sup>25</sup> <https://eur03.safelinks.protection.outlook.com/?url=https%3A%2F%2Frepository.tudelft.nl%2Fislandora%2Fobject%2Fuuid%3A64161304-4714-4214-9790-e0da4a71399d%3Fcollection%3Dresearch&data=02%7C01%7C%7Cf086eadac64a43f6998208d842d029f6%7C15f3fe0ed7124981bc7cfe949af215bb%7C0%7C0%7C637332809120119449&sdata=mREquYS3%2BkKtN9rO8aT%2FV6EjGi9u7VNPYXCZZHIGTAs%3D&reserved=0>



the vertical reference level, available for the main tide gauges in the Netherlands. These records go back to 1850-1880's, depending on the station.

---

**Ik ben u op het spoor gekomen via het rapport over de zeespiegel langs de Nederlandse kust. Ik hoop dat u mij op weg kunt helpen met de volgende vraag. Conclusie in het rapport is dat de stijging tot nu toe niet is versneld en achter raakt op de wereldwijde zeespiegelstijging die met satellieten gemeten wordt en wel lijkt te versnellen. Mogelijke verklaring hiervoor is het zwaartekrachteffect. Wat ik mij nu afvraag is als de stijging in Nederland gedempt wordt, dan zal dat toch als effect hebben dat ergens anders op de aarde de zeespiegelstijging “versneld” versneld?**

Hieronder vindt u een overzicht van stations waar er een hoge versnelling is. Een versnelling kan meerdere vormen hebben. Een plotselinge verandering in hoogte (zoals in Ayukawa), een trendbreuk (zoals in Manilla) of een geleidelijke verandering in de hellingshoek (zoals in de Finse en Zweedse stations te berekenen is).

U maakte ook een opmerking over de versnelling van versnelling. Daarbij de volgende rekenkundige/taalkundige opmerking. We kijken meestal naar de stand (hoe hoog staat het water), naar de stijging van de zeespiegel (hoeveel stijgt de zeespiegel elk jaar) en naar de versnelling van de zeespiegel (stijgt de zeespiegel steeds sneller). Zo kan je nog verder gaan en dan krijg je een versnelling van de zeespiegelstijging (nog een orde hoger). En nog een orde hoger de versnelling van de zeespiegelversnelling. Naar die laatste twee kijken we normaal niet. Toch wordt de term “de versnelling van de zeespiegelstijging” wel vaak gebruikt. Meestal bedoelen mensen als ze zeggen “de versnelling van de zeespiegelstijging” eigenlijk “de versnelling van de zeespiegel”.

Enkele voorbeelden van stations waar de zeespiegel het meest versneld is vindt u hieronder. Dit zijn vooral stations waar iets bijzonders aan de hand is:

- Langs de Japanse kust, doordat stations instantaan zijn verzakt door aardbevingen, bijvoorbeeld Ayukawa <sup>26</sup>
- Mossel Bay (Zuid Afrika), daar zijn diverse problemen met het station (zie opmerkingen <sup>27</sup>)
- Murmansk II in Rusland, niet echt aan de open zee. Is inmiddels weer gedaald <sup>28</sup>. Zie ook daar opmerkingen bij het station.
- Brisbane. Daar is vooral een versnelling voor en na de breuk in de metingen <sup>29</sup>. Metingen worden vaak gestart als er een probleem is met de zeespiegel.
- Nelson in NZ. Daar ook vooral een versnelling na een breuk in de metingen <sup>30</sup>.
- Manilla. Als voorbeeld van een station met een wat langere meetreeks. Deze versnelling wordt toegeschreven aan depositie en land aanwinning <sup>31</sup>.
- Batumi. Ook een voorbeeld van een station met een langere reeks. De tectonische plaat is in beweging <sup>32</sup>.

---

<sup>26</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/131.php>

<sup>27</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/910.php>

<sup>28</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/687.php>

<sup>29</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/822.php>

<sup>30</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/787.php>

<sup>31</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/145.php>

<sup>32</sup> <https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/51.php>

**Ik heb veel data via de [Permanent Service for Mean Sea Level](#) kunnen vinden en flink met excel aan de stoei geweest maar er lijkt niet één plaats op de aarde te zijn waar de stijging überhaupt versnelt laat staan “versneld” versnelt. Weet u zo’n plaats op de aarde of is die er inderdaad niet?**

Van de stations met langere reeksen (>100 jaar) is de versnelling beperkt en niet op het oog zichtbaar. De top 5 van versnellingen bestaat uit stations waar de zeespiegel steeds minder snel daalt:

- Furuogrund <sup>33</sup>
- Klaipeda <sup>34</sup>
- Pietarsaari <sup>35</sup>
- Smogen <sup>36</sup>
- Mantyluoto <sup>37</sup>

---

**Deltares en HKV lijn in water in opdracht van Rijkswaterstaat gewerkt aan een nieuwe methode om de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust nauwkeuriger te bepalen. De conclusie is dat de zeespiegel de afgelopen 128 jaar met 1,86 mm per jaar (18,6 cm per eeuw) is gestegen en dat de stijging niet is versneld. Die andere 28 jaar moeten daar dus nog vanaf neem ik aan?**

Hartelijk dank voor uw vraag. Als ik het goed begrijp vindt u het verwarrend dat er in zowel naar 128 jaar en naar een eeuw verwezen wordt in één zin. Hieronder schrijf ik het iets meer uit:

De stijging is berekend over de periode van 1890 tot en met 2017. Dat zijn 128 jaar. Over die periode was de stijging gemiddeld 1,86 mm per jaar, ook uit te drukken als 18,6 cm per eeuw. De totale stijging is 1,86mm/jaar \* 128jaar is 238,08mm, ook uit te drukken als 23,8 cm (afgerond op mm).

Zie ook het volledige rapport <sup>38</sup>.

*PBL*

**Een vraag over zeespiegel langs de Nederlandse kust. Heb jij de jaargetallen voor de zes heel oude kuststations al beschikbaar en wil je ze mij al ter beschikking stellen? Ik wil binnenkort de [CLO-pagina over zeespiegel](#) updaten Ik bedoel dan de jaargemiddelde stijging die aansluit (zonder verdere correctie) op de data op de PSMSL-website. Uiteraard gebruik ik de data met bronvermelding**

Ik heb de cijfers tot en met 2018 (met gemiddelde over de zes hoofdstations) hier neergezet. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2595087> De laatste versie staat in het mapje data/deltares/results: dutch-sea-level-monitor-export-2019-09-29.csv

We hebben ook voorlopige cijfers over 2019, maar die heb ik nog niet gecontroleerd.

---

<sup>33</sup><https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/203.php>

<sup>34</sup><https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/118.php>

<sup>35</sup><https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/194.php>

<sup>36</sup><https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/179.php>

<sup>37</sup><https://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/172.php>

<sup>38</sup><https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/03/Zeespiegelmonitor-2018-final.pdf>



Je kan ook de door Rijkswaterstaat aangeleverde gegevens hier terugvinden:  
<https://www.psmsl.org/data/obtaining/>

Er zijn twee bronnen: - Metrisch (wat er gemeten is zonder correcties voor veranderingen in hoogtemodel) - Revised Local Reference (wat er gemeten is met een correctie voor verandering in referentiestelsels). Deze gebruik ik meestal omdat het NAP is aangepast in 2005.

De berekeningen om jaargemiddelden en correcties te doen kan je hier <sup>39</sup> terugvinden.

---

**In de oude CLO-tekst schat ik dat de bodemdaling langs de hele kust ongeveer 0.2 mm/jaar is. Die schatting heb ik gehaald uit Kooi et al. (1998) en Kooi (2008). Die daling verloopt van 0.0 tot 0.3 mm/jaar en gemiddeld ongeveer 0.2mm/jaar. Maar in Hijma en Kooi (2018, Deltares rapport deel II) staan heel andere cijfers, die jij ook overneemt. Deze cijfers zijn veel groter en gemiddeld over de zes stations ruwweg een daling van 0.45 mm/ jaar. Veel groter dus dan mijn 0.2 mm/jaar. Mijn vraag kloppen de nieuwe cijfers en had ik verouderde inzichten?**

Volgens mij stond in Kooi et al. (1998) <sup>40</sup> ook al een cijfer van 0.4 mm / jaar bodemdaling. Uit de paper lees ik: "Estimates of isostasy and compaction movements at the coast are  $I = -0.30.5$  mm/yr and  $C = -0.10.05$ , respectively." Ik zie wel dat deze cijfers vaak verkeerd worden overgenomen. In de oude KNMI scenario's (volgens mij 2006) heeft ook wel eens 1mm/jaar gestaan, volgens mij met dezelfde bron. Dus het kan zo maar zijn dat je ze wel correct hebt overgenomen, maar niet rechtstreeks uit Kooi 1998.

---

**Verder: opmerkelijk die enorme daling bij Delfzijl door gas/olie winning. Wel raar dat Rijkswaterstaat die weggecorrigeerd heeft .. Vreemd toch? Tenminste vermoedelijk want jij weet het ook niet zeker, schrijf je.**

Die "weggecorrigeerd" bodemdaling bij Delfzijl is op zich wel te verdedigen. Het NAP is een gedefinieerd als vlak, en Groningen wijkt daar lokaal van af. Daar moet je lokaal iets voor verzinnen. Dat is toen de bodemdaling begonnen is ook gedaan. Maar hoe, dat was niet goed bekend. De stukken waarin het vastgelegd is waren praktisch onvindbaar. Uiteindelijk heeft RWS de stukken gevonden in een archief. Daarin stond netjes beschreven hoe er in de jaren 1970 mee omgegaan is. Ik heb geen logboeken van de landmeters en kalibraties van de stations. Of er ten alle tijden consistent mee omgegaan is, kan ik dus niet checken. Vandaar dat ik deze aannames met enige voorzichtigheid formuleer in het rapport.

---

<sup>39</sup><https://nbviewer.ipython.org/github/openearth/sealevel/blob/master/notebooks/dutch-sea-level-monitor.ipynb>

<sup>40</sup>[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195198002091?casa\\_token=ybhUG6nha2kAAAAA:ppmVHw4oblCKIi7utcgW01gMIYLj\\_tXSp79UgtXA0xQ6kuOq7KPdpmb1-Q-ICVkJXyNiYKLFSDc](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195198002091?casa_token=ybhUG6nha2kAAAAA:ppmVHw4oblCKIi7utcgW01gMIYLj_tXSp79UgtXA0xQ6kuOq7KPdpmb1-Q-ICVkJXyNiYKLFSDc)

Ik kwam bij Riva et al. (2017) een bodemstijging tegen die jij niet noemt. In het CLO schrijf ik: “Naast deze bodemdaling speelt het smelten van het ijs op Groenland mogelijk een rol. Riva et al. (2017) laten zien dat dit afsmelten een bodemstijging veroorzaakt ter hoogte van Engeland van gemiddeld 0,4 mm per jaar over de periode 1902-2014. Daarbij vinden zij een versnelling in de laatste decaden.” Die 0,4 mm per jaar is best heel veel (rondom Engeland maar dat is toch vlakbij NL). Ken jij dit werk en kan dat echt, dat opveren door ijsmassa-verlies op Groenland. Ik ben dit verder ook nergens tegengekomen..

Ik zal nog even vragen aan mijn collega, of hij de getallen van Riva kan duiden.

---

### Verder nog een verzoek om voorlopige berekeningen

Verwezen naar getallen op de Github repository voor de Zeespiegelmonitor.

*Deltaprogramma*

**Voor de Signaalgroep van het Deltaprogramma willen we de zeespiegeldata langs de NL kust uit de Zeespiegelmonitor ontsluiten via een Signaalgroep dashboard. Kunnen jullie ons helpen aan een beschrijving van de manier waarop we die data kunnen ophalen?**

De zeespiegelmonitor wordt periodiek gereleased en gearchiveerd bij zenodo. Van die url kan je ervan uitgaan dat die altijd beschikbaar is.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3952423> Daar staat de data in:  
data/deltares/results/dutch-sea-level-monitor-export-2020-07-20.csv

Als je de data rechtstreeks wil inlezen (zonder uitpakken van een zipfile) dan kan je ook de de data van github halen. Zorg dat je naar een tag verwijst zodat de url niet meer verandert als iemand de directory structuur aanpast.

<https://raw.githubusercontent.com/openearth/sealevel/v2019.0.1/data/deltares/results/dutch-sea-level-monitor-export-2020-07-20.csv>

RWS heeft de data over 2019 nog niet gevalideerd en gepubliceerd. De huidige data loopt tot en met 2018. Voorlopige data (tot vandaag) kan je opvragen via RWS DDL (niet triviaal).

Context en duiding graag even afstemmen met Willem. Merk op dat PBL ook een dashboard heeft voor een brede verzameling van indicatoren <sup>41</sup>, de zeespiegelstijging zit daar ook in. Als je een thema specifiek dashboard maakt, dan kan je de gegevensverwerking en updates etc.. via CLO kunnen laten lopen. Dan doe je geen werk dubbel.

---

<sup>41</sup><https://www.clo.nl/indicatoren/nl0229-zeespiegelstand-nederland-en-mondiaal>

## E Datasets en archivering

De actuele versie van gegevens per station staat op [Github](#).

Uitleg:

De data gemiddeld over alle stations staan hier:  
(<https://github.com/openearth/sealevel/blob/master/data/deltares/results/dutch-sea-level-monitor-export-2022-01-14.csv>)

Uitleg:

In de uitvoering van de methodiek van de Zeespiegelmonitor is in het verleden al aandacht besteed aan het archiveren van historische gegevens. Rijkswaterstaat is continu bezig om dit proces te verbeteren waar mogelijk.

in [NAPinfo](#) wordt de actuele en historische posities van alle nulpalen vastgelegd.

[Waterinfo-extra](#) is de omgeving van Rijkswaterstaat voor ontsluiting van watergerelateerde gegevens en informatie, voor zover deze niet in de primaire systemen beschikbaar wordt gemaakt. Rijkswaterstaat werkt aan het publiceren van de jaargemiddelde waterstanden voor de hoofdstations in deze omgeving, inclusief de informatie om deze gegevens te duiden.

Tabel E.1 Verklaring van tabel 'gegevens per station'

veldnaam	betekenis
t	tijdstip
year	jaar
height	gemiddelde gemeten waterhoogte in cm
interpolated	geïnterpoleerd (Y/N)
flags	kwaliteitswaardecode
station	stationcode (als in PSMSL)
alpha	
u	gemiddelde windsnelheid in m/s (west-oostrichting)
v	gemiddelde windsnelheid in m/s (noord-zuidrichting)
speed	absolute gemiddelde windsnelheid in m/s
direction	gemiddelde windrichting
u2main	
u2perp	
u2	gemiddelde windsnelheid in de gemiddelde windrichting in m/s
v2	gemiddelde windsnelheid haaks op de gemiddelde windrichting in m/s
predicted_linear_with_wind	lineair voorspelde waterhoogte in cm zonder nodaal getij en met wind

Tabel E.2 Verklaring van tabel dutch-sea-level-monitor-export

veldnaam	betekenis
index	index
year	jaar
height	gemiddelde gemeten waterhoogte in cm
u2	gemiddelde windsnelheid in de gemiddelde windrichting in m/s
predicted_linear_without_wind	lineair voorspelde waterhoogte in cm zonder wind
predicted_linear_mean_wind	lineair voorspelde waterhoogte in cm met jaargemiddelde wind
predicted_linear_mean_wind_ci_025	
predicted_linear_mean_wind_ci_975	
predicted_linear_mean_wind_pi_025	
predicted_linear_mean_wind_pi_975	
sea_surface_height_due_to_tide	lineair voorspelde waterhoogte in cm zonder nodaal getij en met wind
date	datum

# F Oorzaken zeespiegelverandering

De zeespiegel wordt beïnvloed door verschillende processen die variëren in tijd en ruimte Cazenave and Moreira (2022). Een deel van de zeespiegelveranderingen aan de Nederlandse kust vindt zijn oorsprong in de globale processen. Een ander deel vindt zijn oorsprong in regionale (in de Noordzee) en lokale processen (langs de Nederlandse kust). Dit is weergegeven in figuur F.1. Dit overzicht sluit aan bij de indeling die het IPCC gebruikt (Legg 2021). Zie Gregory et al. (2019) voor een overzicht van de terminologie. In dit rapport maken we gebruik van actuele gemeten gegevens, op basis van publiek beschikbare gegevensbronnen.

Naast de fysische oorzaken zijn er diverse methodologische keuzes die verschillen in de geschatte hoogte van de zeespiegel kunnen veroorzaken. Er zijn onnauwkeurigheden in de diverse meetmethoden. Daarnaast kan de beperkte historische dekking van de metingen voor vertekening zorgen van de geschatte zeespiegelstijging. De invloed van regionale en lokale aspecten van de zeespiegel varieert per gebied. De Noordzee is onderdeel van het continentaal plat van Europa en is daardoor relatief ondiep. Hierdoor zijn op de tijdschaal van jaren tot decaden, het getij en windopzet de belangrijkste processen die bijdragen aan variaties in de regionale zeespiegel langs de Nederlandse kust.

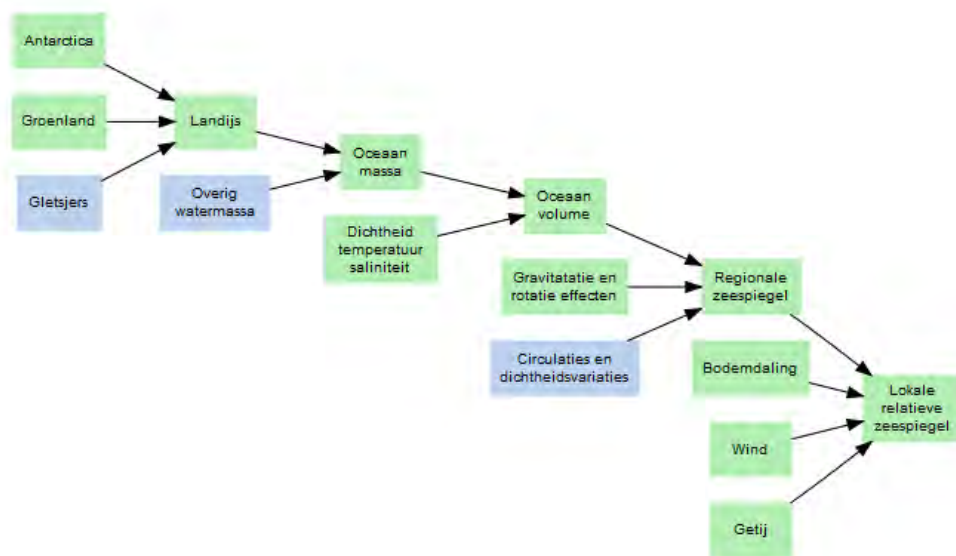
De term absolute zeespiegel wordt gebruikt voor de hoogte ten opzichte van de geoïde, het vlak dat het water zou volgen als er geen wind, getij en stroming zouden zijn in de oceaan. Lokaal is de relatieve zeespiegelstijging, de combinatie van bodembeweging en absolute zeespiegelstijging, vaak meer relevant.

## F.1 Definitie zeespiegelstand

Voor we de stijging van de zeespiegel kunnen definiëren moeten we eerst de zeespiegelstand definiëren. Om de zeespiegelstand te definiëren maken we doorgaans gebruik van een “gemiddelde zeespiegel”. Omdat de zeespiegel van minuut tot minuut en van uur tot uur varieert middelen we de zeespiegel vaak eerst uit over een bepaalde periode (maand of jaar). De zeespiegelstand van uur tot uur noemen we de waterstand of waterhoogte. Als we alleen zeespiegelstand of zeespiegel noemen bedoelen we doorgaans de gemiddelde zeespiegelstand. De zeespiegel moet altijd ten opzichte van een referentie worden bepaald. Aan de kust gebruiken we NAP, op zee de geoïde. Dit wordt hieronder uitgelegd. .

Aan de kust wordt de zeespiegel gemeten ten opzichte van een vast kenmerk. In Nederland is dat ten opzichte van het NAP vlak. Omdat de zeespiegel kan veranderen door verandering van het referentiepeil op land (bodembeweging) of aanpassing van het volume van het water noemen we dit ook wel relatieve zeespiegelstand. De Intergovernmental Oceanografische Commissie heeft procedures beschreven om van metingen van een getijdestations tot een zeespiegelstand te komen (UNESCO/IOC (2020)).

De tweede manier om de zeespiegelstand te bepalen is ten opzichte van de geoïde en te meten met satellieten. Door de hoogte van het zeespiegeloppervlak te meten over alle oceanen kan de globaal gemiddelde zeespiegel worden bepaald. Het is niet makkelijk om de zeespiegel netjes te refereren aan de geoïde. Daarom worden ook wel zeespiegelanomaliteiten gebruikt. Zeespiegelanomaliteiten zijn zeespiegelstanden



Figuur F.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.

uitgedrukt ten opzichte van gemiddelde zeespiegelstanden over een eerdere periode (Author 2022).

Gebaseerd op de zeespiegelstanden kan een zeespiegelstijging worden bepaald. Een trend wordt altijd vastgesteld over een periode. De methoden voor het bepalen van de zeespiegelstijging worden verder besproken in hoofdstuk 2.

## F.2 Methoden

Er zijn verschillende methoden om indicatoren voor de zeespiegelstijging te kwantificeren.

- Boekhouden - In deze methode worden op grote schaal een balans opgesteld van bekende componenten die bijdragen aan een fenomeen. Ook voor zeespiegelstijging worden er budgetten opgesteld. Met deze aanpak worden antwoorden gegeven op vragen als, waar komt de meeste zeespiegelstijging vandaan, van Antarctica of van Groenland? Met een gegeven lijstje oorzaken, kan de grootte van de verschillende bijdragen geschat worden. Men maakt gebruik van beschrijvende statistiek en bij voorkeur van gemeten gegevens.
- Data science - De methode op basis van data science 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 en gesimuleerde gegevens.
- Simuleren - Als processen goed begrepen worden kunnen ze ook in een numeriek model gevat worden. Hiermee worden processen gesimuleerd. 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 maakt gebruik van alle drie de methoden. 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.

## F.3 Mondiale zeespiegelstijging

Absolute zeespiegelstijging wordt grotendeels veroorzaakt door twee componenten (Zie bijvoorbeeld Chambers et al. 2017): de totale hoeveelheid water in de oceaan (toename van massa) of in de dichtheid van het water (toename van volume). Beide componenten zorgen ervoor dat het oceaankvolume toeneemt.

- Dichtheid - Het oceaankwater wordt warmer doordat de oppervlaktetemperatuur stijgt. Hierdoor neemt de dichtheid van het oceaankwater af en is er een toename in oceaankvolume.
- Massa - De massa van de oceaankwater neemt toe door een toename van de totale hoeveelheid water in de oceaan. De massa kan toenemen door bijvoorbeeld het smelten van gletsjers en ijskappen (landijs) en veranderingen in opslag van land-water.

Een overzicht van de uitsplitsing van de globale zeespiegelstijging, over de periode 1990-2017 is te vinden in figuur F.2. Deze uitsplitsing wordt gebruikt om de betrouwbaarheid van de schattingen te bepalen. 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, Qu, and Willis 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 (Lovel et al. 2014). Sterisch slaat op de verandering in dichtheid door temperatuursverandering (thermosterisch) of veranderingen in het zoutgehalte in water (halosterische effect). Om de grafieken op elkaar aan te laten sluiten worden diverse correcties en filters toegepast. In figuur F.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 oceaanbodembodem zakt waardoor het oceaانبodem toeneemt. Bij een constant zeeniveau stijgt na het toepassen van deze correctie de globale zeespiegel met 0.3mm/. 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.

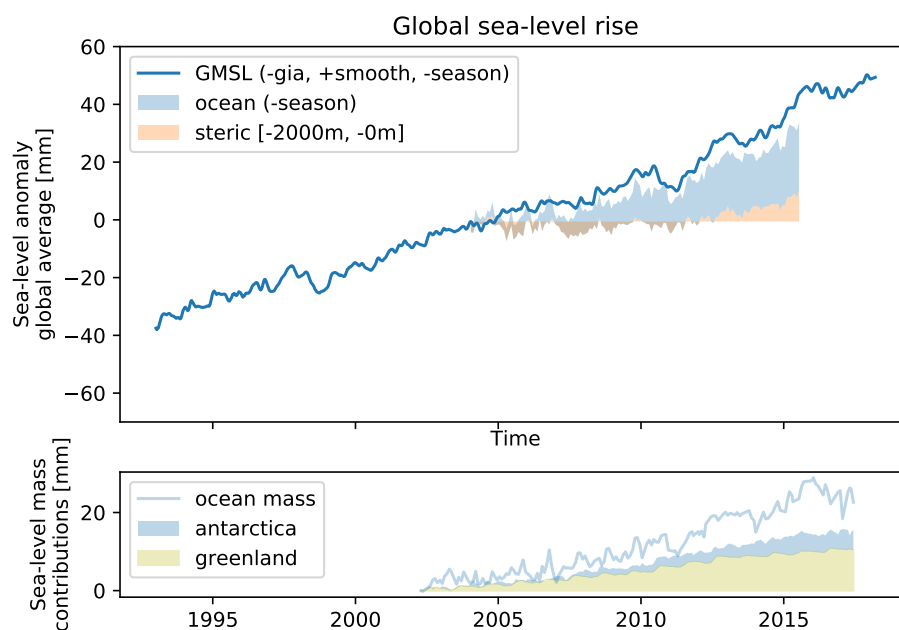
In het bovenste paneel van figuur F.2 is te zien dat de sterische component (tot 2000m diep) en de toename van de oceaan massa samen gelijk zijn aan de geobserveerde zeespiegelstijging. Vanaf 2004 komt ongeveer een derde van de zeespiegelstijging door veranderingen in dichtheid (sterisch component) en twee derde de toename van massa van de oceaan. Het onderste paneel van figuur F.2 laat zien dat de toename van massa met name komt door het afsmelten en afkalven van het ijs op Groenland. Een nadere beschouwing van deze balans is uitgewerkt door Cazenave et al. (2018) als onderdeel van het [World Climate Research Programme \(WCRP\)](#). Ze komen tot de conclusie dat de gemeten zeespiegeltrend 0.37 mm 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 1.4 mm/jaar en de toename door temperatuurstoename op 1.3 mm/jaar. Volgens Horwath et al. (2022) zijn veranderingen in dichtheid en massa verantwoordelijk voor, respectievelijk, 38% en 57% van de mondiale zeespiegelstijging van 3 mm/jaar.

### F.3.1 Sinds de laatste ijstijd

De laatste keer dat de wereldwijd gemiddelde zeespiegel zo hoog stond als tegenwoordig was aan het einde van laatste interglaciale periode (McKay, Overpeck, and Otto-Bliesner 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 (figuur F.3). De grootste stijging, 20m in 500 jaar 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). Voor Nederland hebben we een goed beeld van de zeespiegelstijging in de laatste 9000 jaar (Marc P. Hijma and Cohen 2019). In die periode steeg de relatieve zeespiegel ongeveer 22 m, met een maximale stijging van 4 m in 200 jaar als gevolg van het leeglopen van grote ijsmeren in Noord-Amerika.

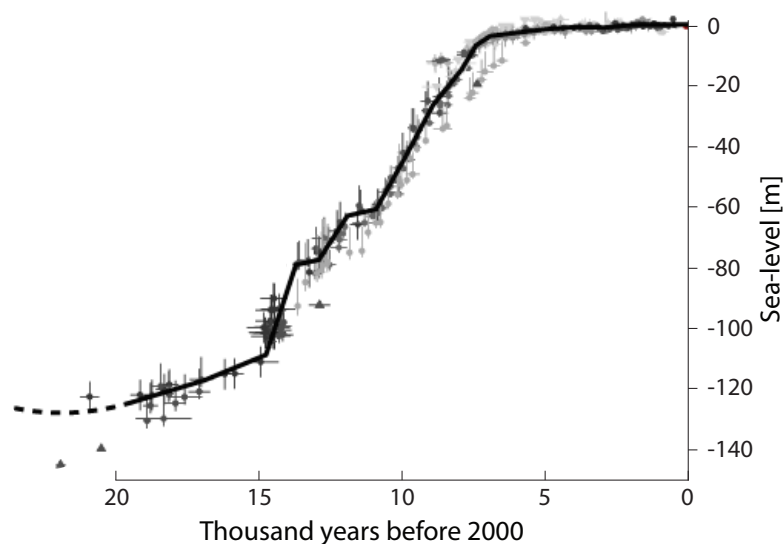
Gek genoeg is de zeespiegelstijging over de laatste eeuwen lastiger te bepalen dan





Figuur F.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 door over het jaar te middelen.

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 van voor die tijd zijn schaars. Een mooi voorbeeld is de analyse van schilderijen van Venetië waaruit bleek dat de relatieve zeespiegel daar sinds 1700 constant stijgt (Camuffo, Bertolin, and Schenal 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 .

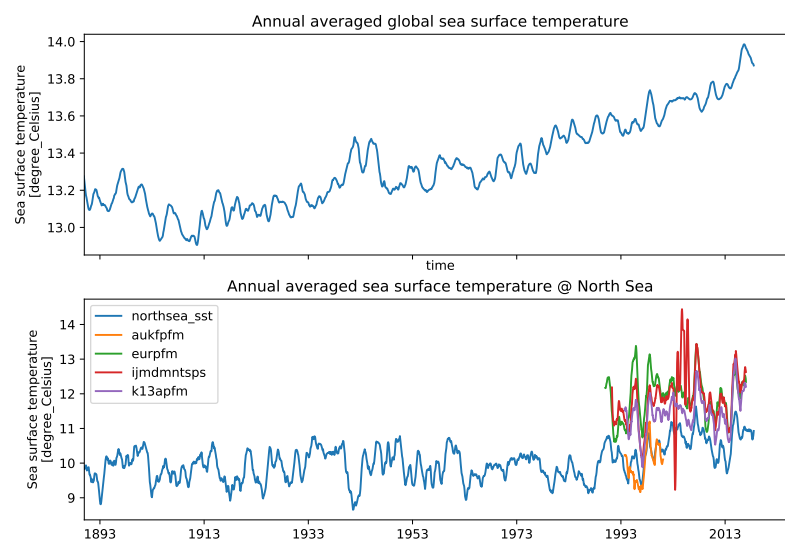


Figuur F.3 Relatieve zeespiegelstijging sinds de laatste ijstijd, gebaseerd op figuur van Robert A. Rohde (gebruikt in verschillende publicaties, oorspronkelijke bron wikipedia). Zie Lambeck et al. (2014) voor een wetenschappelijke beschouwing.

### F.3.2 Veranderingen in dichtheid

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 en dus meer volume inneemt. Zoet water heeft de hoogste dichtheid bij 4 °C, maar 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 (figuur F.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 figuur F.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 zeewatertemperatuur te kijken. Als de temperatuur van alle oceanen in de wereld stijgt zorgt dat ook voor zeespiegelstijging in Nederland. Doordat de Noordzee ondiep is, is het effect van lokale uitzetting beperkt.

Voor het berekenen van de toename van de volume is niet de temperatuur van het oceaanoppervlak van belang, maar de temperatuur over de hele diepte van de oceaan. Om de temperatuur in de diepe oceanen beter in kaart te brengen is begin van de eeuw het [Argo](#) programma opgezet, een mondiaal netwerk van duizenden boeien waar ook Nederland aan bijdraagt. Deze 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](#)



Figuur F.4 Zeespiegeloppervlakte temperatuur, globaal (ERSST v5, boven) en in de Noordzee (ERSST v5 en Rijkswaterstaat (RWS) stations, onder) .

et al. 2014). schatten de bijdrage van de diepe oceaan aan de zeespiegelstijging op ongeveer 0.1mm. De schatting van de zeespiegelbijdrage van de bovenste 2000m bedraagt 1.1mm op basis van data van (Llovel et al. 2014; Roemmich and Gilson 2009), zoals weergegeven in F.3.

### F.3.3 Massaveranderingen, gletsjers, landijs en zeeijs

De globale zeespiegelveranderingen (gemiddeld over alle oceanen) liet zien dat ongeveer 1.8 /jaarm van de globale zeespiegelstijging kan worden toegeschreven aan veranderingen in massa. Voorbeelden van processen die bijdragen aan veranderingen in oceaansmassa zijn:

- Afvoer van land (rivieren, ijsmassa's, gletsjers, grondwateronttrekkingen)
- Veranderingen in opslag van water op land - Smelten van gletsjers en landijs
- Verdamping

Voor de schatting van de bijdrage van zeespiegelstijging wordt vaak hoofdzakelijk gekeken naar veranderingen in massa van landijs en van gletsjers. 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. Er zijn verschillende methoden beschikbaar, zowel *in-situ* als op basis van satellieten. Directe metingen van veranderingen in lokale massa zijn mogelijk 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. Op basis van deze metingen kan de hoeveelheid massa van het ijs op gletsjers en de ijskappen geschat worden (Tapley et al. 2019). Bijna al het landijs ligt opgeslagen op de ijskappen op Antarctica en Groenland. Desondanks domineerde de bijdrage van de gletsjers de landijs contributie aan zeespiegelstijging over de 20<sup>ste</sup> eeuw (IPCC Climate Change 2013). Dit doordat op korte tijdschalen, gletsjer sneller reageren op klimatologische veranderingen dan de grote ijskappen. Over de periode 2003 - 2009 was het massaverlies van de gletsjers gelijk aan 259 gigaton per jaar, gelijk aan de bijdrage van beide ijskappen en gelijk aan een bijdrage van 29% van de geobserveerde zeespiegelstijging (Gardner et al. 2013). De laatste schattingen van de massabalans

van gletsjers laten een duidelijk afname zien met een versnelling over de laatste twee decennia [\(Rignot et al. 2011\)](#). De bijdrage van smeltende gletsjers aan zeespiegelstijging is in de orde van 0.7 mm/jaar [\(Ciraci, Velicogna, and Swenson \(2020\)\)](#).

Sinds 1995 is de bijdrage van Groenland aan het versnellen [\(Rignot et al. 2011\)](#) en wordt de bijdrage van de ijskappen belangrijker. Op Antarctica ligt de grootste massa van ijs, 27Mkm<sup>3</sup> of een equivalent van 58m zeespiegelstijging [\(Fretwell et al. 2013\)](#). Op Groenland ligt xxxm een equivalent van xx m zeespiegelstijging. Over de periode 2003 tot 2018 is er 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 over 15 jaar of 2.7 cm/eeuw. Zie ook een analyse van een langere reeks aan gegevens door [Team \(2018\)](#).

### **Animatie massaverlies Antarctica**

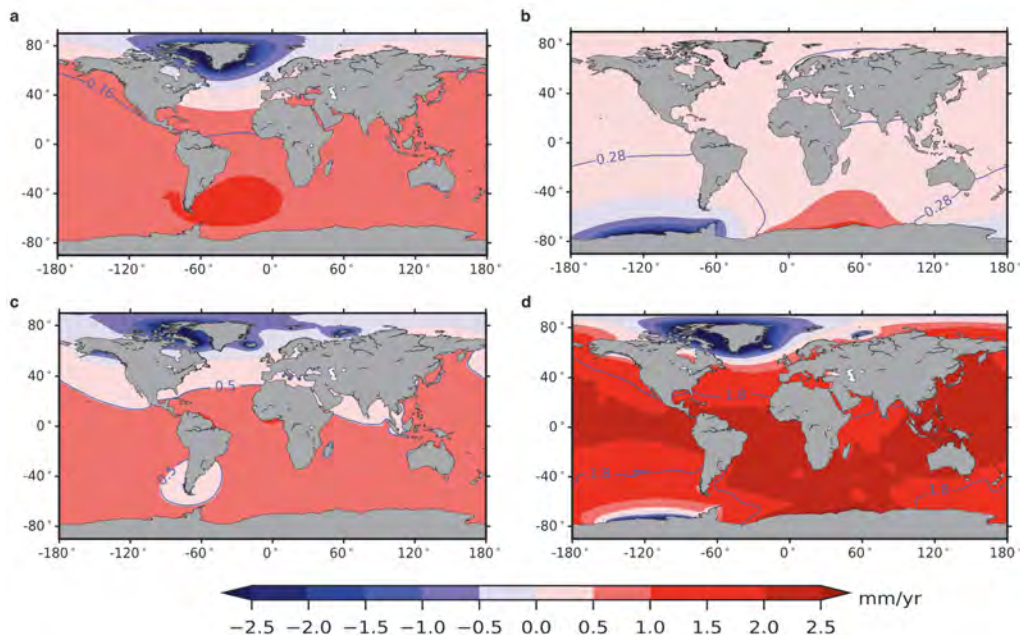
Om zicht te houden op processen die bijdragen aan Nederlandse zeespiegelstijging is binnen de Zeespiegelmonitor een [animatie](#) gemaakt die het massaverlies op Antarctica laat zien op twee verschillende plaatsen: De Thwaites Gletsjer (links) en de Pine Island Gletsjer (rechts). De animatie laat de verandering van ijsmassa zien als bewerkte radarbeelden en als grafiek (linksonder). Duidelijk zijn de verschillende processen te zien (gletsjerbeweging, afbreken, verlies van zeeijs). Een overzicht van het hele gebied is te zien rechtsonder.

Verandering van opslag van water op land kunnen veroorzaakt worden door zowel klimaatvariabiliteit (veranderingen in neerslag, verdamping en rivierafvoer) en door menselijke interventies (zoals afdammen van rivieren en grondwateronttrekkingen). Het signaal van deze component als bijdrage in zeespiegelstijging is klein ten opzichte van de natuurlijke variatie. Vaak worden opslag op en onttrekkingen uit het land tegen elkaar weggestreept [\(Stocker, Qin, Plattner, Tignor, Allen, Boschung, Nauels, Xia, Bex, Midgley, and others 2013\)](#). Op basis van satellietinformatie lukt het wel om het effect van onttrekkingen van grondwater [\(Yoshihide Wada et al. 2010; Y. Wada et al. 2017\)](#) en 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](#)). De laatste wetenschappelijke schatting is dat de verandering van de opslag van water op land een positieve bijdrage levert aan de zeespiegelstijging, namelijk van  $0.41 \pm 0.11$  mm/yr over 2003 - 2016 [\(Cáceres et al. 2020\)](#).

Het afsmelten van zeeijs heeft geen invloed op de hoogte zeespiegel. Het drijvende ijs ligt al in het water en verplaatst net zoveel water als de eigen massa (wet van Archimedes). Er zijn wel indirecte invloeden. 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 paragraaf [F.4.2](#). Op Antarctica en Groenland werkt het zeeijs als tegenkracht tegen het afbrokkelen van het landijs. 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 F.6 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 lijnen geven aan waar de stijging evenredig is met de smelting, licht rode en blauwe vakken krijgen minder dan gemiddelde zeespiegelstijging, donker rode vlakken meer dan gemiddeld. Uit Hsu and Velicogna (2017).

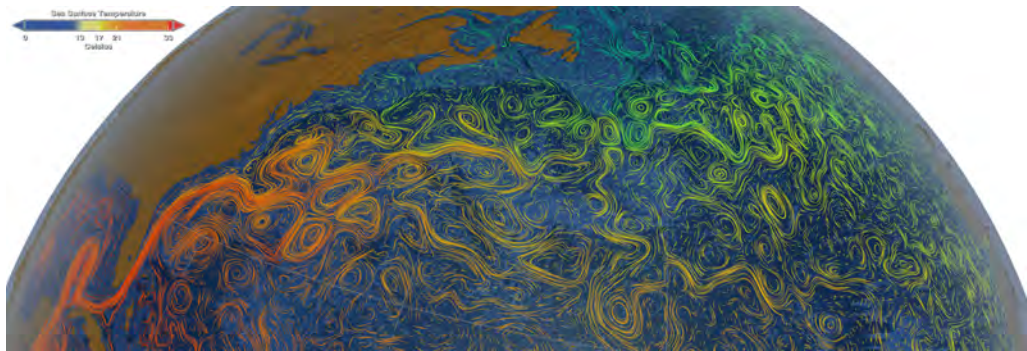
terwijl het globaal gemiddeld 1.8mm/jaar is. Het meest ongunstig liggen Ivoorkust, Indonesië en Papoea-Nieuw-Guinea en de Noordkust van Australië

Deze onderverdeling komt grotendeels overeen met de verwachte vingerafdrukken (zie bijvoorbeeld voor de Wadden [Vermeersen et al. 2018](#)). Voor Nederland betekent dit dat we nagenoeg geen zeespiegelstijging verwachten als het gevolg van het afsmelten van Groenland. Dat we slechts ongeveer 60% van de zeespiegelstijging van smeltende 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 bodemstijging ondervinden van de laatste ijstijd, op een van de de meest gunstige plekken ter wereld.

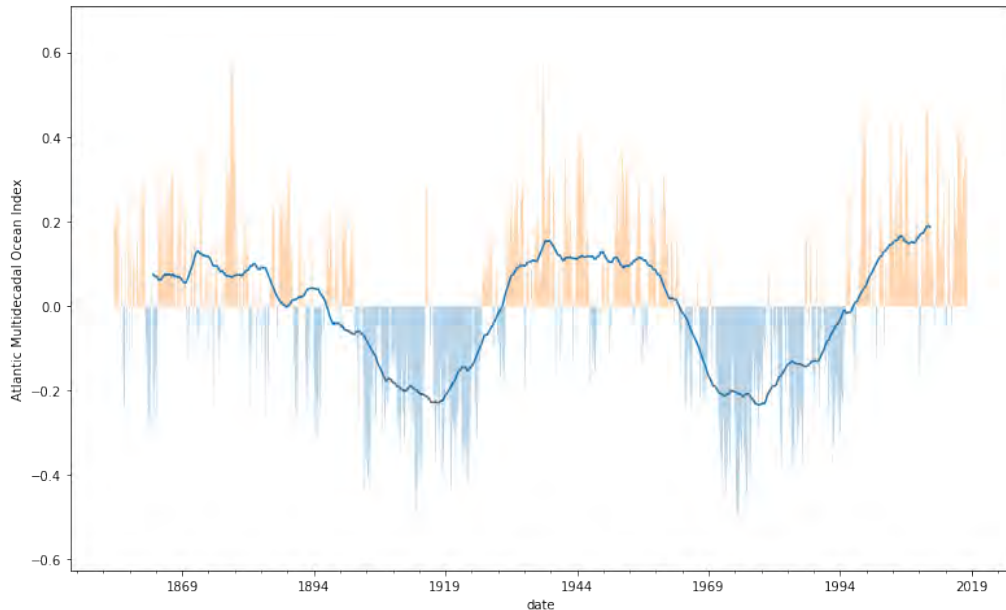
#### F.4.2 Circulaties

Regionale verschillen in zeespiegel ontstaan ook door redistributie of ocean water massa door oceaancirculaties. Oceaancirculatie, weergegeven in figuur F.7, wordt gedreven door verschillen in temperatuur, saliniteit, het corioliseffect en de kracht van de wind op het oppervlak van de oceaan.

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 variatie in de temperatuur van de Noord Atlantische Oceaan. Op dit moment is de [AMO](#) index hoger dan gemiddeld F.8. De temperatuur van de Noord Atlantische Oceaan is 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



Figuur F.7 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.



Figuur F.8 Atlantische Multidecadale Oscillatie, een hoge waarde hangt samen met een warme Noord Atlantische Oceaan, data: [National Oceanic and Atmospheric Administration \(NOAA\)](#).

kust beïnvloedt.

### F.4.3 Luchtdruk

De zeespiegel verandert ook in reactie op een verandering in luchtdruk. Als er ruimtelijk luchtdruk verschillen ontstaan, dan stijgt de zeespiegel op de plek met de laagste luchtdruk terwijl in een gebied met hoge luchtdruk het zeeoppervlak naar beneden wordt gedrukt ([Dickman 1988](#)). Dit heet het inverse barometer effect waarbij de zeespiegel stijgt met 1 cm bij een daling van 1 millibar ([Wunsch and Stammer 1997](#)). Er is conservatie of massa, dus ruimtelijke gemiddeld is er geen verandering in zeespiegel. Het effect is relatief klein, maar niet verwaarloosbaar in gebieden met een lage breedtegraad als Nederland. Dit effect vindt ook 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.

Tabel F.1 Frequenties van het getij [@Doodson1921]

Frequentie (/h)	periode	Bron
14.4920521	1 dag	aarde draait rond
0.5490165	1 maand	maan draait om de aarde
0.0410686	1 jaar	scheve aarde draait om zon
0.0046418	8.85 jaar	afstand van aarde tot maan varieert
0.0022064	18.613 jaar	baan maan om aarde kantelt ten opzichte van baan aarde om zon
0.0000020	20940 jaar	afstand van aarde tot zon varieert

#### F.4.4 Wind

Lokaal en incidenteel wordt de zeespiegel beïnvloed door wind ([Van Dantzig 1960](#)). Aan de Nederlandse kust leidt harde wind uit het westen tot noorden tot een verhoogde zeespiegel (windopzet) ten opzichte van het gemiddelde, tegengestelde wind leidt tot een verlaagde zeespiegel (). Een analyse voor de Wadenzee en aangrenzende Noordzee wordt veel van het windeffect verklaard met de west-oost component [[Gerkema and Duran-matute \(2017\)](#)]. Windopzet kan incidenteel enkele meters bedragen. Het effect hiervan op de jaargemiddelde zeespiegel is in de orde van enkele centimeters.

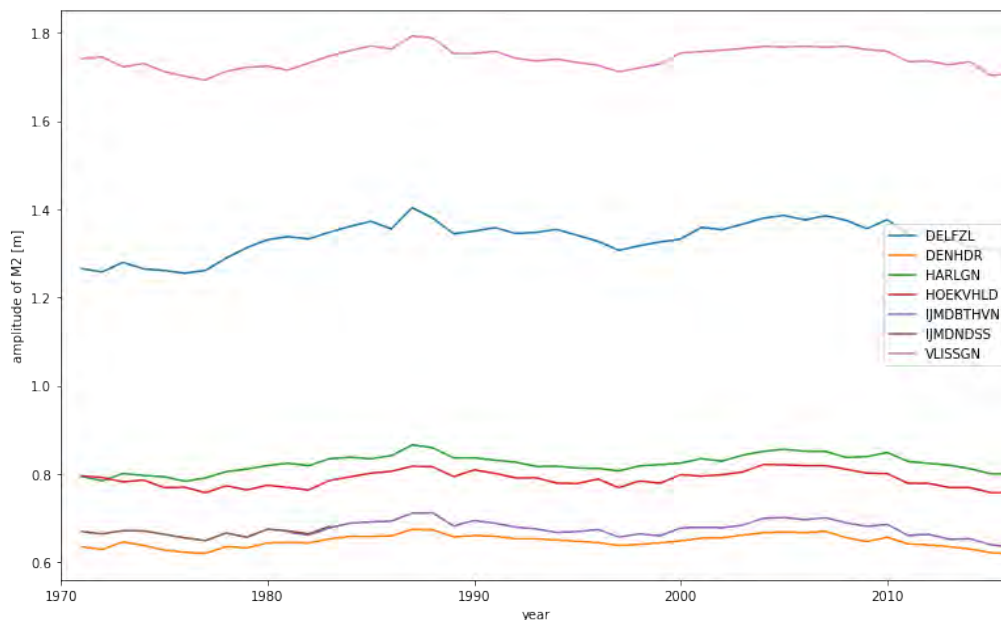
#### F.4.5 Getij

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 F.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, Dzieciuch, and Jayne 2002](#)).

De getijamplitude is niet overal langs de kust hetzelfde (figuur F.9). 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, Shallow water overtides of principal lunar constituent (M4), Principal solar semidiurnal constituent (S2), Lunar diurnal constituent (O1), Larger lunar elliptic semidiurnal constituent (N2), Shallow water quarter diurnal constituent (MS4), Variational constituent (MU2), Smaller lunar elliptic semidiurnal constituent (L2), Shallow water quarter diurnal constituent (MN4), Lunar diurnal constituent (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, Aagaard, and Kuijpers 2016](#)) omdat de manifestatie van het getij in metingen niet altijd overeenkomt met de theorie.





Figuur F.9 Amplitude van **Principal lunar semidiurnal constituent (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).

#### F.4.6 Bodemdaling

Al sinds we begonnen zijn met waterstandsmetingen is de vraag welk deel van de veranderingen wordt veroorzaakt door bodemdaling en welk deel door absolute zeespiegelstijging. Om die 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 paragraaf beantwoord. De tweede vraag in paragraaf H.2.

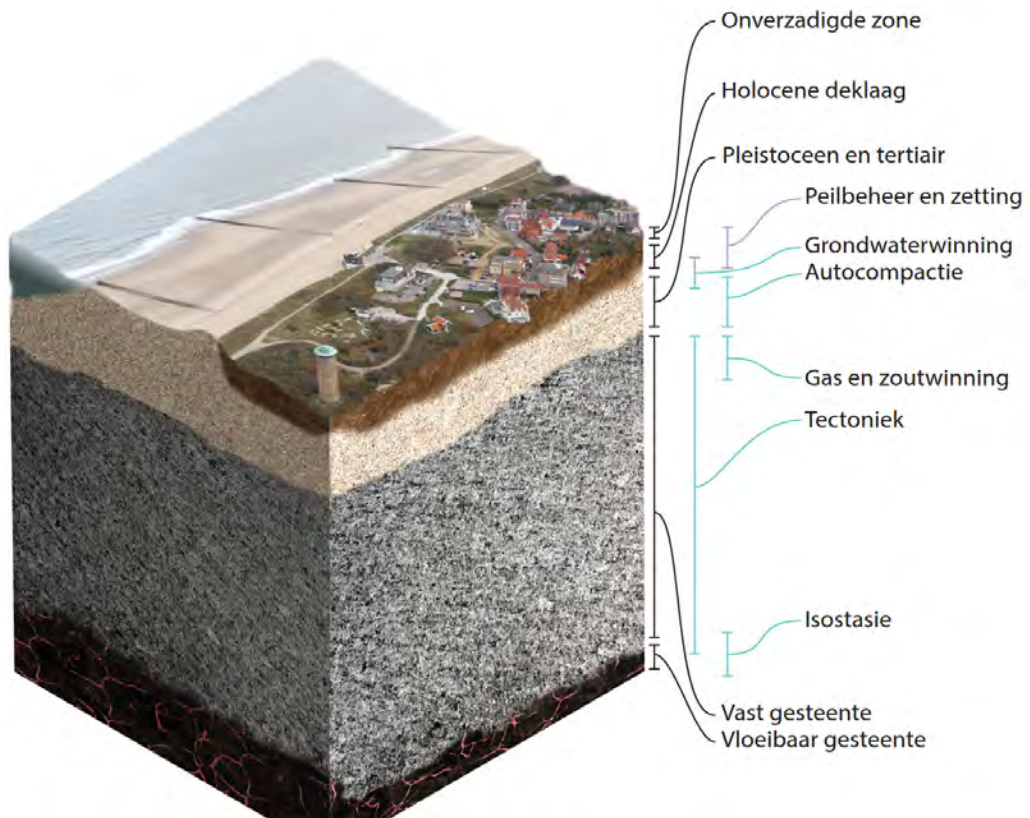
Tegenwoordig maken we onderscheid tussen de termen ‘absolute zeespiegelstijging’ en de term ‘relatieve zeespiegelstijging’. Met absolute zeespiegelstijging bedoelen we de zeespiegelstijging ten opzichte van de geoïde. Met relatieve zeespiegel bedoelen we de combinatie van absolute zeespiegelstijging 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 levert absolute zeespiegelstijging de grootste bijdrage aan relatieve zeespiegelstijging. Het afknippen van de sedimenttoevoer levert in de meeste delta’s een grotere bijdrage (Ericson et al. 2006), omdat de bodemdaling in de delta’s niet meer gecompenseerd wordt door sedimentatie. In verstedelijkte delta’s zijn het winnen van gas en water onder de eigen bodem en compactie veel voorkomende oorzaken van de relatieve zeespiegelstijging (zie bijvoorbeeld Abidin et al. 2011).

In deze paragraaf, uitgewerkt op basis van (M. Hijma and Kooi 2017; M. P. Hijma and Kooi 2018), onderscheiden we verschillende processen die voor bodemdaling kunnen zorgen, zoals weergegeven in tabel F.2 . Deze zijn visueel weergegeven in F.10.

De invloed van autocompactie en tektoniek, langs de Nederlandse kust, worden door M. Hijma and Kooi (2017) geschat op minder dan 0.1mm/jaar. De bijdrage van

Tabel F.2 Oorzaken van bodemdaling, naar (M. Hijma and Kooi 2017).

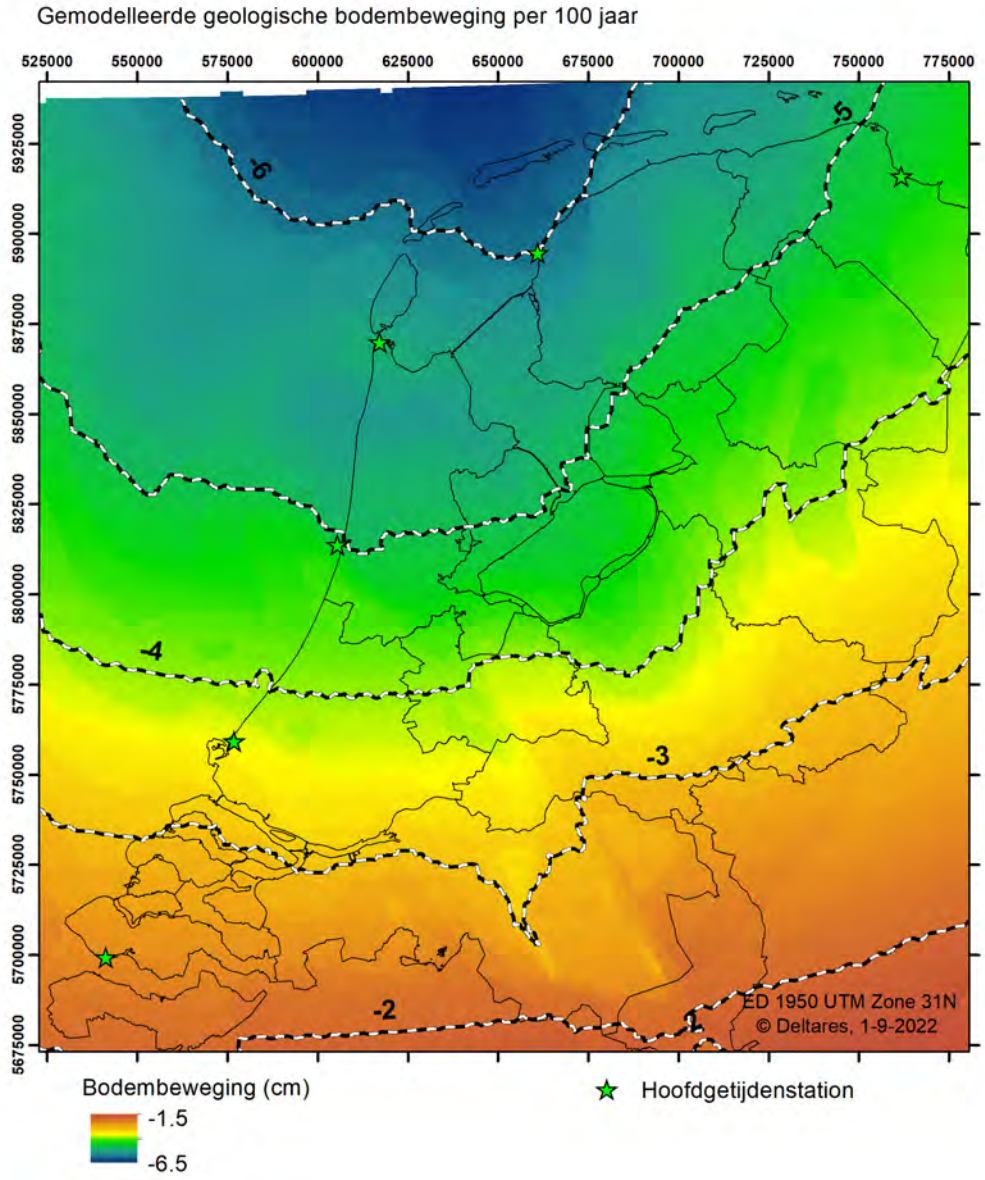
Oorzaak	Component	Mechanisme
Geologisch	Tektoniek	Spanningen in de ca. 100 km dikke Euraziatische aardplaat waar Nederland deel van uitmaakt. de Afrikaanse en Euraziatische aardplaat bewegen naar elkaar toe. Europa en Noord Amerika drijven van elkaar.
	Isostasie	Het terugbuigen van de noord-west Europese plaat door het afsmelten van de grote ijskappen die in de laatste glaciale 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.



Figuur F.10 Lagen van de bodem en oorzaken van bodemdaling aan de Nederlandse kust. Blauwe oorzaken zitten in de relatieve zeespiegelstijgingsmetingen. De paarse oorzaken niet.

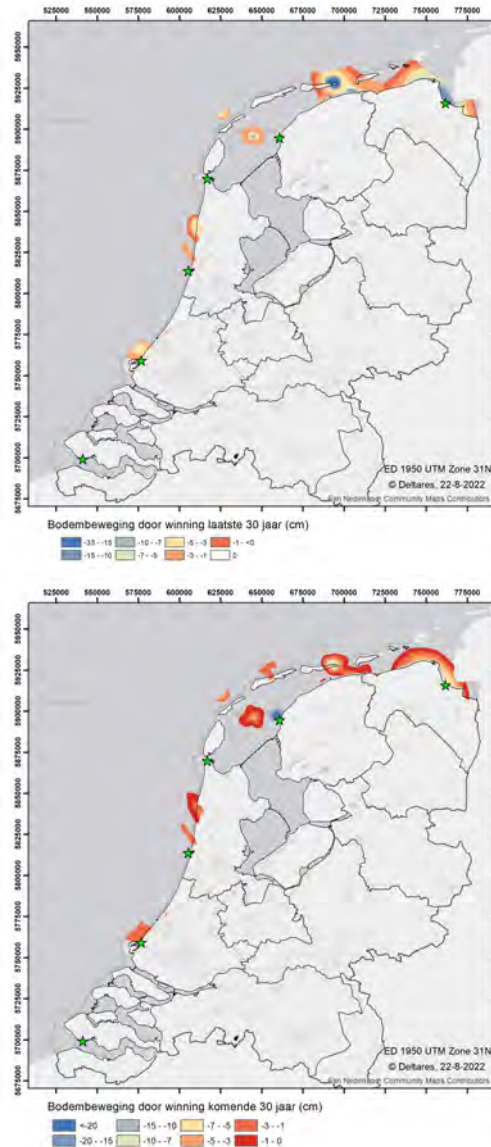
isostasie is groter in Noord Nederland (0.3 mm/jaar–0.7 mm/jaar) dan in Zuid Nederland (0.2 mm/jaar–0.5 mm/jaar), zoals te zien in figuur F.11. De gevolgen van zout en gaswinning staan weergegeven in figuur F.12. Tot nu toe zijn het vooral de gaswinningen die voor een aanzienlijke bodemdaling hebben gezorgd.

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 GNSS apparatuur uit te rusten. Hiermee kan de verandering van de zeespiegel ten opzichte van de peilbout bepaald worden, maar ook ten opzichte van de geoïde. Een aantal hoofdgetijdenstations heeft al heel lang een GNSS-ontvanger. In Vlissingen wordt bijvoorbeeld sinds eind 2006 gemeten en in IJmuiden sinds eind 2004. Bij andere hoofdstations stonden soms wel GNSS-ontvangers in de buurt, maar niet op het station zelf. Recent zijn meerdere ontvangers geplaatst, op initiatief van de Bodemdalingsmonitor, bij Hoek van Holland (2021), Den Helder (2022) Harlingen (2022) en Delfzijl (2022). Het zal meerdere jaren duren voordat de bodemdalingstrend bij de stations zichtbaar zal worden in de GNSS-data, maar op termijn zal voor elk station de meerjarige bodemdalingstrend bekend zijn. De gegevens zijn ook opgenomen in internationale datasets. 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 paragraaf H.2.1. Sinds 1958 meten we 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 paragraaf H.1. Simpel samengevat zeggen we doorgaans dat ze gefundeerd zijn op het Pleistoceen. Vóór 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



Figuur F.11 Bodemdaling door tektoniek en isostasie, uit M. P. Hijma (2022).





Figuur F.12 Bodemdaling door winningen (verleden, verwacht), uit M. P. Hijma (2022).

van de bodemdalingscomponenten per station staan in tabel 3.3. 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.

## G Toepassingen

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 de toepassing is opgeschreven en de interpretatie
- Grootheid - bijvoorbeeld 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, uitgangsdokument 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.

### G.1 Kustbeheer

De overheid heeft zich als taak gesteld om de kustlijn en het kustfundament dynamisch te handhaven. We werken 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 Kustlijn zorg; 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 zeespiegel 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 Kustlijn zorg 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 suppletievolumen voor de jaren daarna. Kustfundament, zeespiegelstijging en suppletievolumen zijn direct gekoppeld aan elkaar. De basis voor het huidige suppletievolumen is een rapport uit het

jaar 2000. Mulder (2000) stelt dat de totale suppletiebehoefte bij gelijkblijvende trend in de zeespiegelstijging van  $20 \text{ cm/eeuw}$  wordt geschat op gemiddeld  $12 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$  (met een maximum van 16 miljoen  $\text{Mm}^3/\text{jaar}$ ). 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.

Naam	Huidige zeespiegelstijging
Definitie	De langjarige trend in de jaargemiddelde zeespiegel voor de zes hoofdstations
Grootheid	Waterstand ten opzichte van <b>NAP</b>
Toepassing	Beheer en onderhoud Kust
Oorsprong	3e Kustnota (2000)
Producent	Deltares
Gebruiker	Rijkswaterstaat
Literatuur	Mulder (2000), (D. Dillingh, Baart, and de Ronde 2010), (de Ronde et al. 2014), (F. Baart et al. 2015)

## G.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. Er is tevens een door {EZK} een uitwerking gemaakt voor het eventueel aanpassen van de winning in geval van crisis, **het bescherm- en herstelplan gas**.

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. EZK hanteert bij haar besluitvorming een gebruiksruimte (meegroeivermogen minus het deel hiervan dat dient ter compensatie van de stijgende zeespiegel) van  $5\text{mm/}$ .

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



### G.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 $10^{-4}$ 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)

## G.4 Toetsing/beoordeling

In [Wettelijke BeoordelingsInstrumentarium \(WBI\)](#) ([weblink](#)) 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) |

## G.5 Percentage onder zeeniveau

In ruimtelijke-orderingsvraagstukken 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 [Planbureau voor de Leefomgeving \(PBL\)](#), 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.

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).
Gebruiker	Ministers, wetenschappers, Rijkswaterstaat
Verantwoording	Er is geen publicatie waar het getal wordt uitgerekend. Er is geen methode beschreven.

## G.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 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 2).

Naam	Zeespiegel over 200 jaar
Definitie	Zeespiegel uit scenario maal twee + 10% wind. Gecombineerd met <a href="#">Morphological Analysis (MorphAn)</a> berekening.
Toepassing	Bepaling keur en legger
Oorsprong	( <a href="#">Author 2012</a> )

Type	Planvorming
Context	ECLI:NL:RBSGR:2006:AZ5796
Instituut	Unie van Waterschappen (Keur/Legger), Deltares (MorphAn), KNMI scenario's
Gebruiker verantwoording	Waterschappen (Author 2012)

## G.7 Signalering

Het Deltaprogramma gebruikt adaptief deltamanagement in haar taak om Nederland te beschermen tegen overstromingen, en te zorgen voor voldoende zoet water. Om adaptief te kunnen reageren wordt de "Meten, Weten, Handelen" methodiek gehanteerd. Bij nieuwe externe ontwikkelingen, zoals een versnelde zeespiegel, kan er een signaal afgegeven worden. Elke zes jaar worden de indicatoren en de doelen opnieuw vastgesteld. De methodiek voor de signalering van versnelde zeespiegel moet nog ontwikkeld worden.

Naam	Signalering zeespiegelversnelling
Definitie	Onbepaald
Grootheid	Zeespiegelversnelling
Type	Planvorming
Toepassing	Adaptatief deltamanagement
Oorsprong	Deltaprogramma
Context	Deze indicator wordt beschreven in de (Signaalgroep Deltaprogramma 2018).
Producent	Kennisprogramma zeespiegelstijging
Gebruiker	Deltacommissaris
Verantwoording	Er is nog geen vastgelegde methodiek.

## G.8 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.

Tabel G.8 Trends in zeespiegel indicatoren

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



Hieronder staan de legenda's van de zichtbare kaartlagen.

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

Figuur G.1 Beschermingszones Callantsoog

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.

# H 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 sferoïde, geoïde of als anomaliteit. Dit hoofdstuk beschrijft deze twee meetbronnen.

## H.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 zeespiegeltrends mee te bepalen.

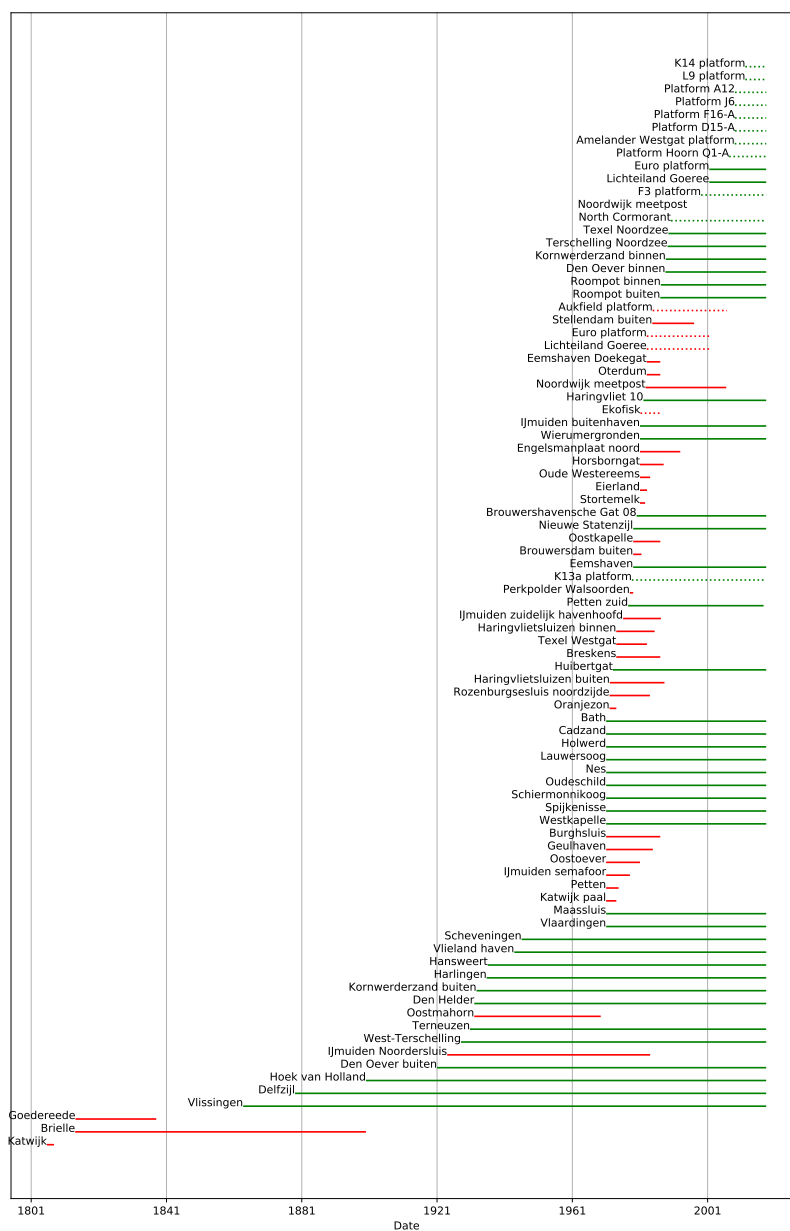
In Nederland zijn er 269 stations bekend die sinds 1890 de hoogte van de waterstand hebben gemeten. Van deze stations liggen er 69 aan de huidige kust en 16 in de Noordzee. Van deze stations zijn er verschillende stations in de loop der tijd verplaatst. Zo is het station van IJmuiden verplaatst van de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

In figuur **H.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 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 figuur **H.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. In de memo hierover (**Fedor Baart 2016**) wordt het meetproces uitgebreid beschreven (zie ook bijlage **C**).

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 H.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).



## H.1.1 Vlissingen



Dit station ligt aan de kade in Vlissingen (51.44210°N, 3.59610°O), nabij de buitenhaven. Het fundament is een stalen damwand tot een diepte van -17.6m NAP, en een breedte van 2.2m. Binnen deze damwand liggen de meetinstrumenten. De onderwaterkamer 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 [filmbeelden](#) beschikbaar. Er is eind 2006 een [GNSS](#)-ontvanger geplaatst.

## H.1.2 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 lengte is geplaatst op een diepte van 23.5m. Dit station is door gaswinning 2 centimeter verzakt ([M. P. Hijma and Kooi 2018](#)) op basis van een schatting van de winningsschotel. Deze verzakking zit al in de metingen doordat het [NAP](#) peilmerk van de nulpaal hier niet voor is gecorrigeerd, zoals bij Delfzijl wel het geval is. In de buurt van het station is een [GNSS](#) station geplaatst en in 2022 is op het gebouw een [GNSS](#)-ontvanger geplaatst.

## H.1.3 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





Figuur H.2 Meetstation Hoek van Holland. Bron: napinfo.



Figuur H.3 Meetstation IJmuiden. Bron: napinfo.



Figuur H.4 Meetstation Den Helder. Bron: napinfo.

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.

#### **H.1.4 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. In 2022 is vlak bij de dijk een **GNSS**-ontvanger geplaatst.

#### **H.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 golfslag 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. In 2021 is een **GNSS**-ontvanger geplaatst op het station.





Figuur H.5 Meetstation Harlingen. Bron: napinfo.



Figuur H.6 Meetstation Delfzijl. Bron: napinfo.

## H.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 (M. P. 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 en in 2022 is op het station zelf ook een GNSS-ontvanger geplaatst.

## H.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 Rijksc commissie Graadmeting voor Waterpassing (nu NCG) voerde de eerste serieuze waterpassingen uit, waarmee het invoeren van het NAP mogelijk werd. Rijkswaterstaat (CIV) is verantwoordelijk voor het beheer van het NAP, in samenwerking 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.

Voor internationale uitwisseling van gegevens van getijstations wordt gebruik gemaakt van een RLR. Voor Nederland wordt dit gebruikt om de **NAP** correctie door te voeren, zoals beschreven in D. Dillingh, Baart, and de Ronde (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. The average of the lower low water height of each tidal day observed over the National Tidal Datum Epoch.** [https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum\\_options.html](https://tidesandcurrents.noaa.gov/datum_options.html) (**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.

## H.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). Een geografisch overzicht van de peilmerken is te vinden op [NAPinfo](#).

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.

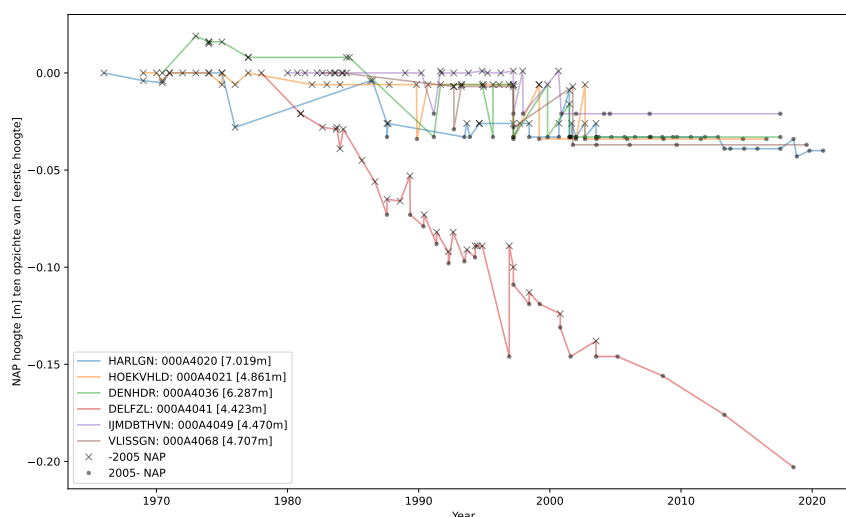
In de loop van de jaren 1990 ontstond het inzicht dat verschillende peilmerken toch niet zo vast waren. Daarom is een revisie doorgevoerd (ook wel bekend als de **NAP** correctie) in de hoogte van de nulpalen (Brand et al. 2004). Anders gezegd, het **NAP** referentiesysteem is opnieuw gerealiseerd wat 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 D. Dillingh, Baart, and de Ronde (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 primaire **NAP**-netwerk 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. Bij de andere stations zit de bodemdaling wel in de zeespiegelstijging, omdat de **NAP**-waardes van de nulpalen sinds 2005 niet meer zijn aangepast, terwijl deze palen ook bewegen.

## H.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 2 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 3 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.



Figuur H.7 Overzicht van de historie van de NAP merken in de buurt van de meetstations. Relatief ten opzichte van de eerste meting. (nulpalen). bron: nap-info

### H.3 Satellietmeting van de zeehoogte

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, Qu, and Willis (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 Noordzee te bepalen. In eerdere rapporten werd gebruik gemaakt van de vergridde data van 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 (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.



# I Varianten

Voor de berekeningen van de zeespiegel zijn de volgende varianten doorgerekend:

## Locaties

Er is voor elk van de volgende locaties of combinatie van locaties doorgerekend.

- Vlissingen
- Hoek van Holland
- Den Helder
- Delfzijl
- Harlingen
- IJmuiden
- Netherlands
- Netherlands (without Delfzijl)

## Model varianten

De modelvarianten die zijn doorgerekend zijn:

- linear
- quadratic
- broken\_linear
- broken\_quadratic

## Wind/stormopzet correcties

Er is met verschillende heranalyses gecorrigeerd voor windopzet

- NCEP1
- 20CR
- Combined
- GTSM

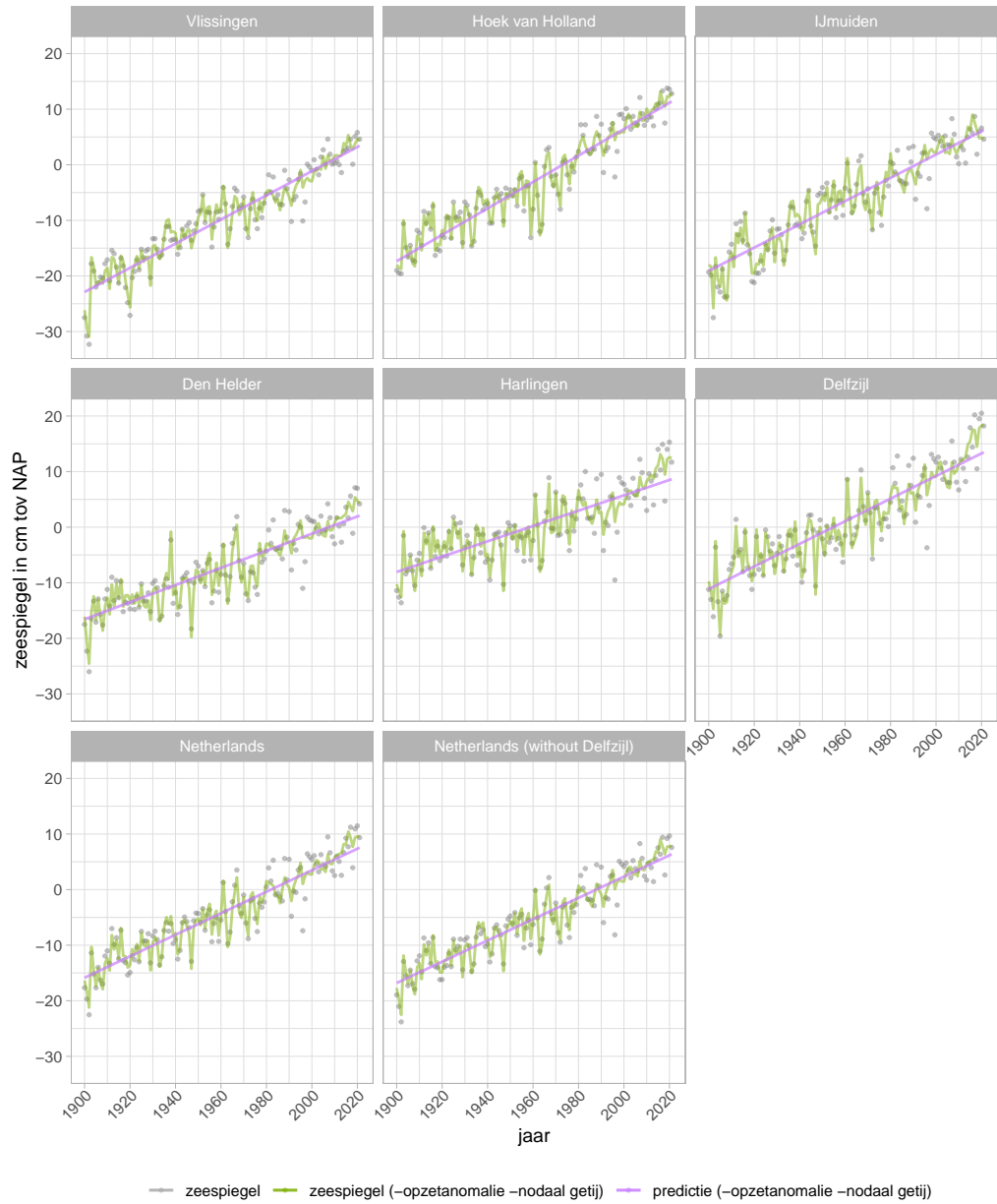
Het effect van surge met de drie windanalyses is meegeschat in de regressiemodellen. Het effect van windopzet uit GTSM is eerst van de zeespiegel afgetrokken, waarna de regressiemodellen zijn uitgevoerd op de 'zeespiegel - opzet'.

Al met al zijn dus  $8 * 4 * 4 = 128$  varianten doorgerekend. In deze appendix worden de belangrijkste resultaten voor al deze varianten naast elkaar gezet.

## I.1 Tijdsreeksen met en zonder wind en/of surge

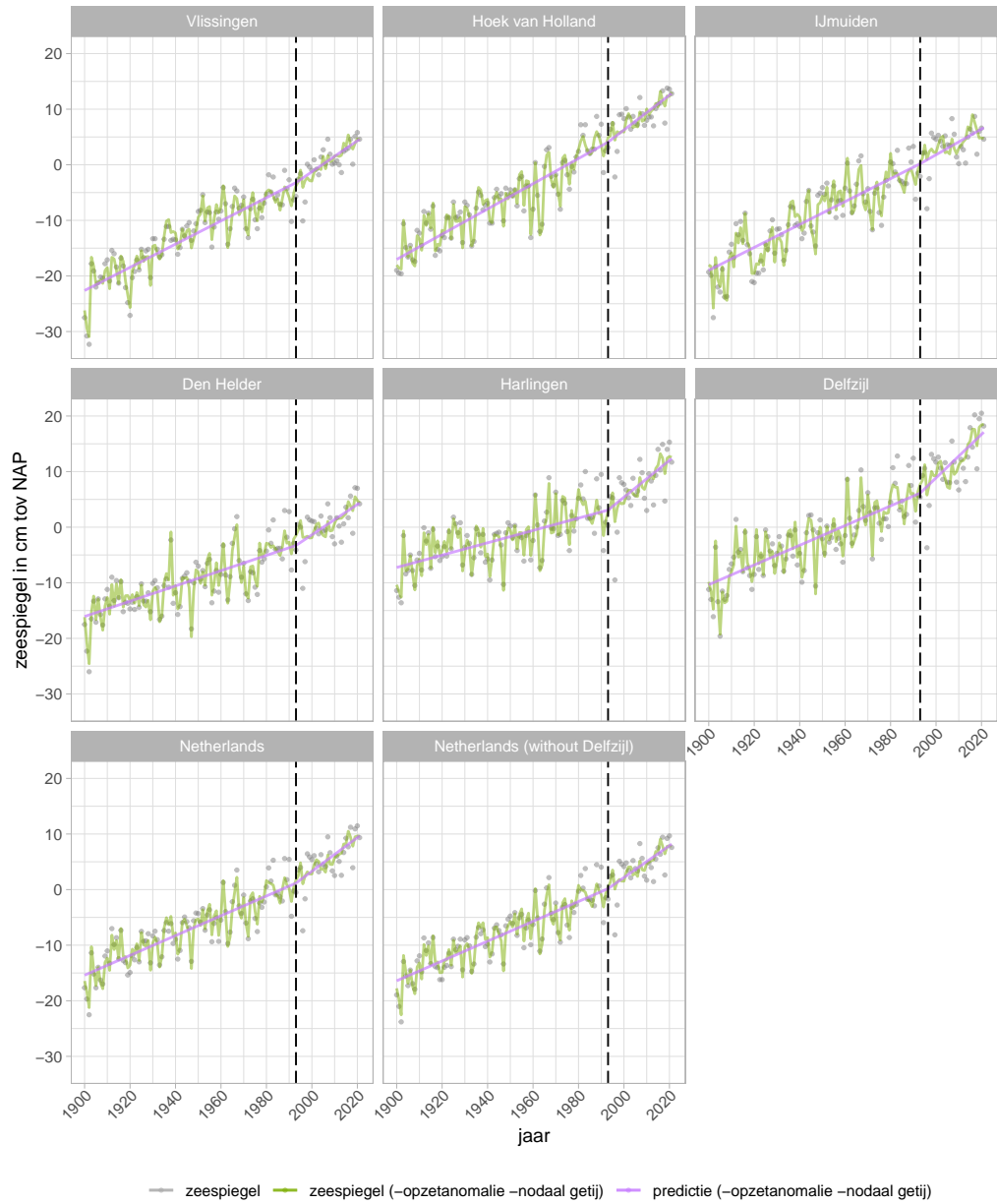
- I.1.1 GTSM en lineair model
- I.1.2 GTSM en gebroken lineair model
- I.1.3 GTSM en kwadratisch model
- I.1.4 GTSM en gebroken kwadratisch model
- I.1.5 NCEP1 en lineair model
- I.1.6 NCEP1 en gebroken lineair model
- I.1.7 NCEP1 en kwadratisch model
- I.1.8 NCEP1 en gebroken kwadratisch model
- I.1.9 20CR en lineair model

Zeespiegel en componenten voor modelvariant linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met GTSM



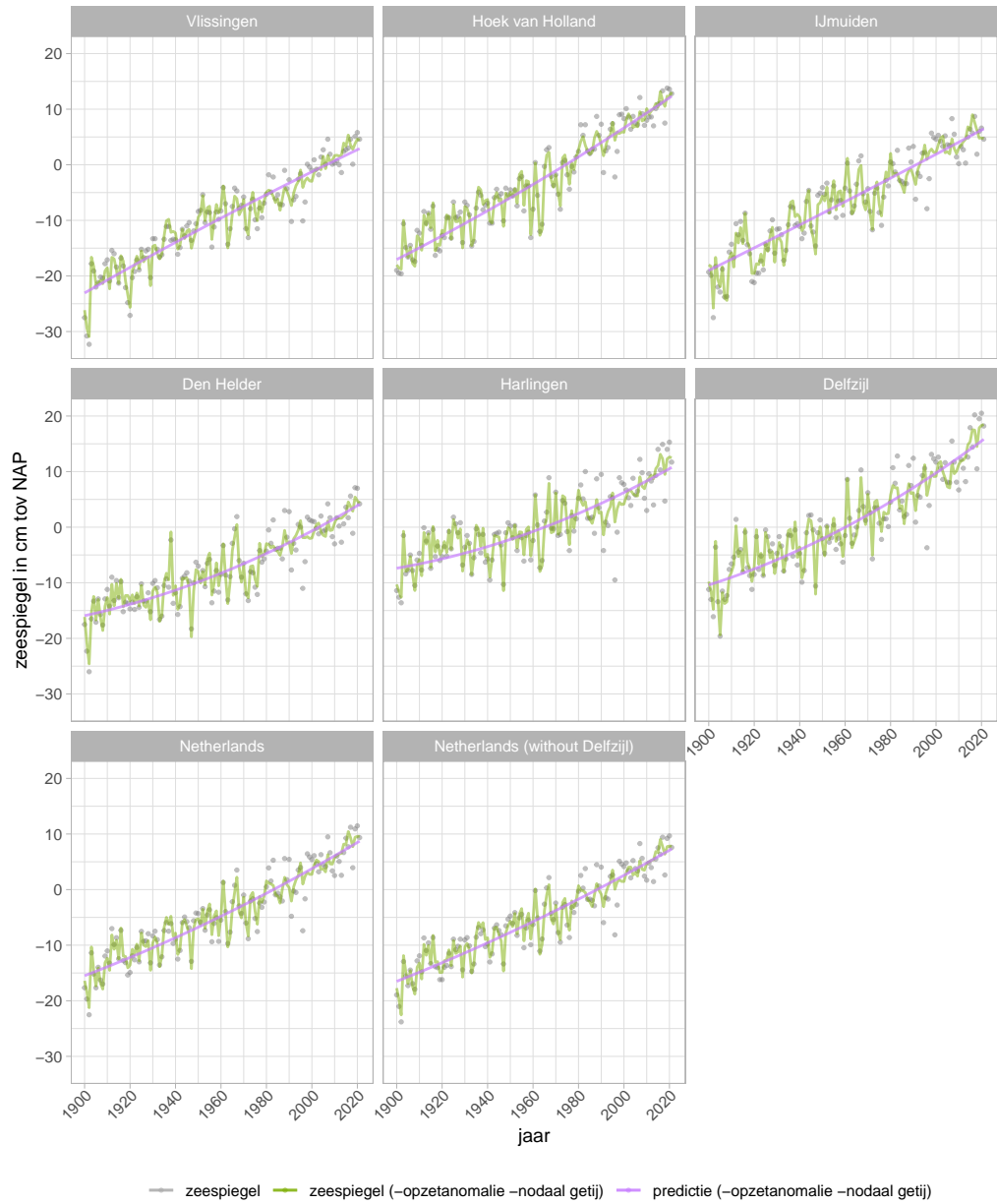
Figuur I.1 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het lineaire model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met GTSM



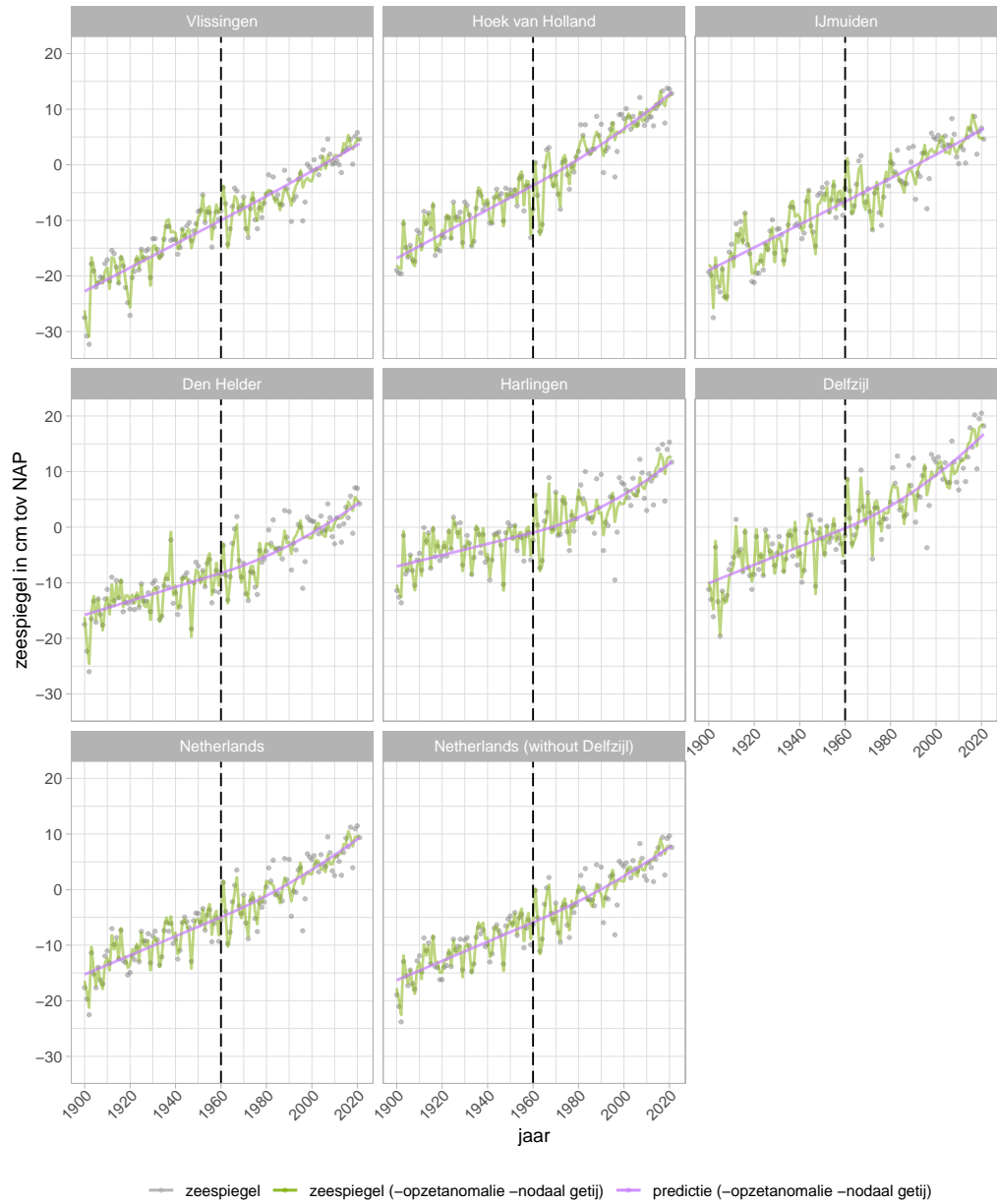
Figuur I.2 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant quadratic en gecorrigeerd voor wind of opzet met GTSM



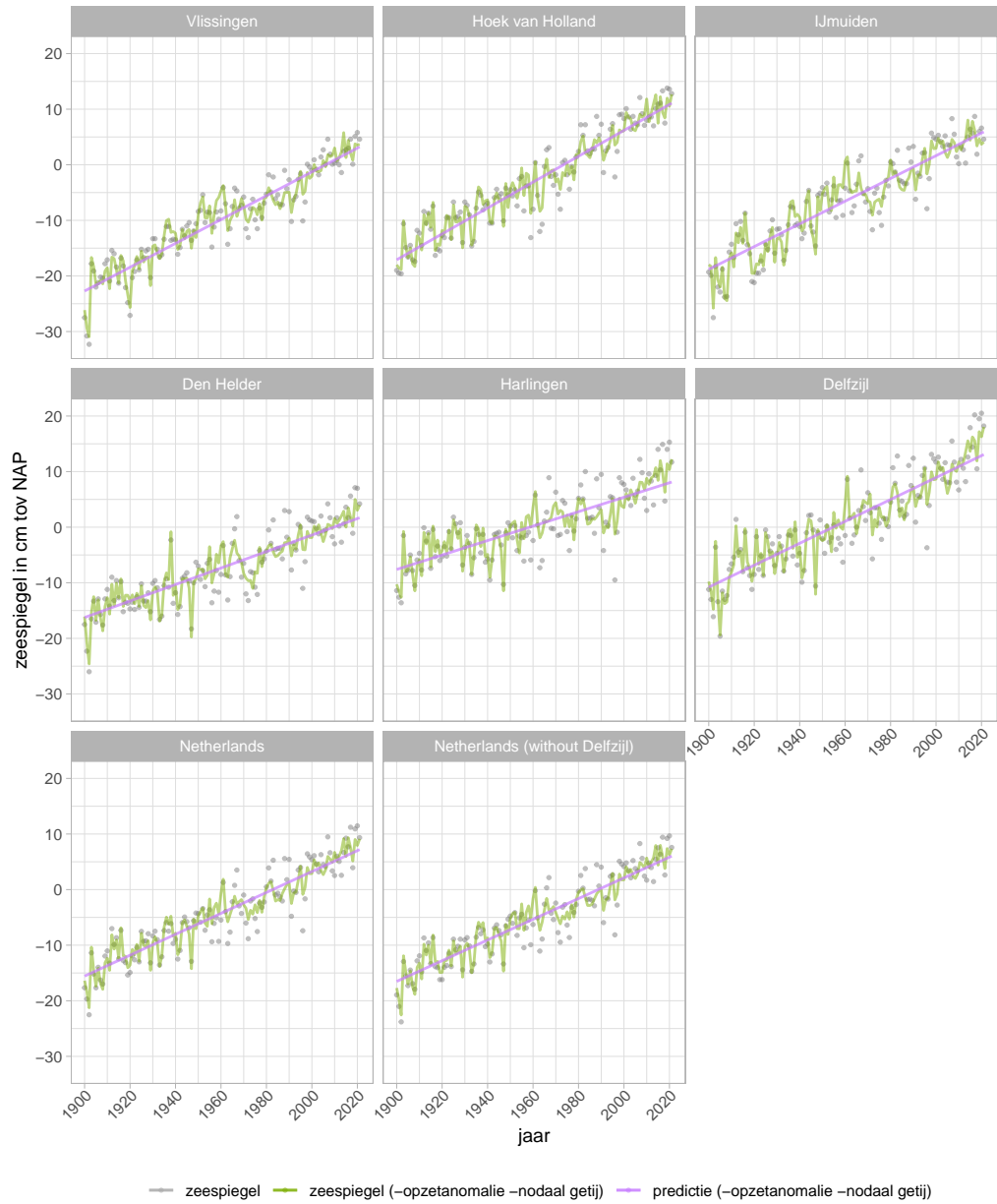
Figuur I.3 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het kwadratische model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_quadratic en gecorrigeerd voor wind of opzet met GTSM



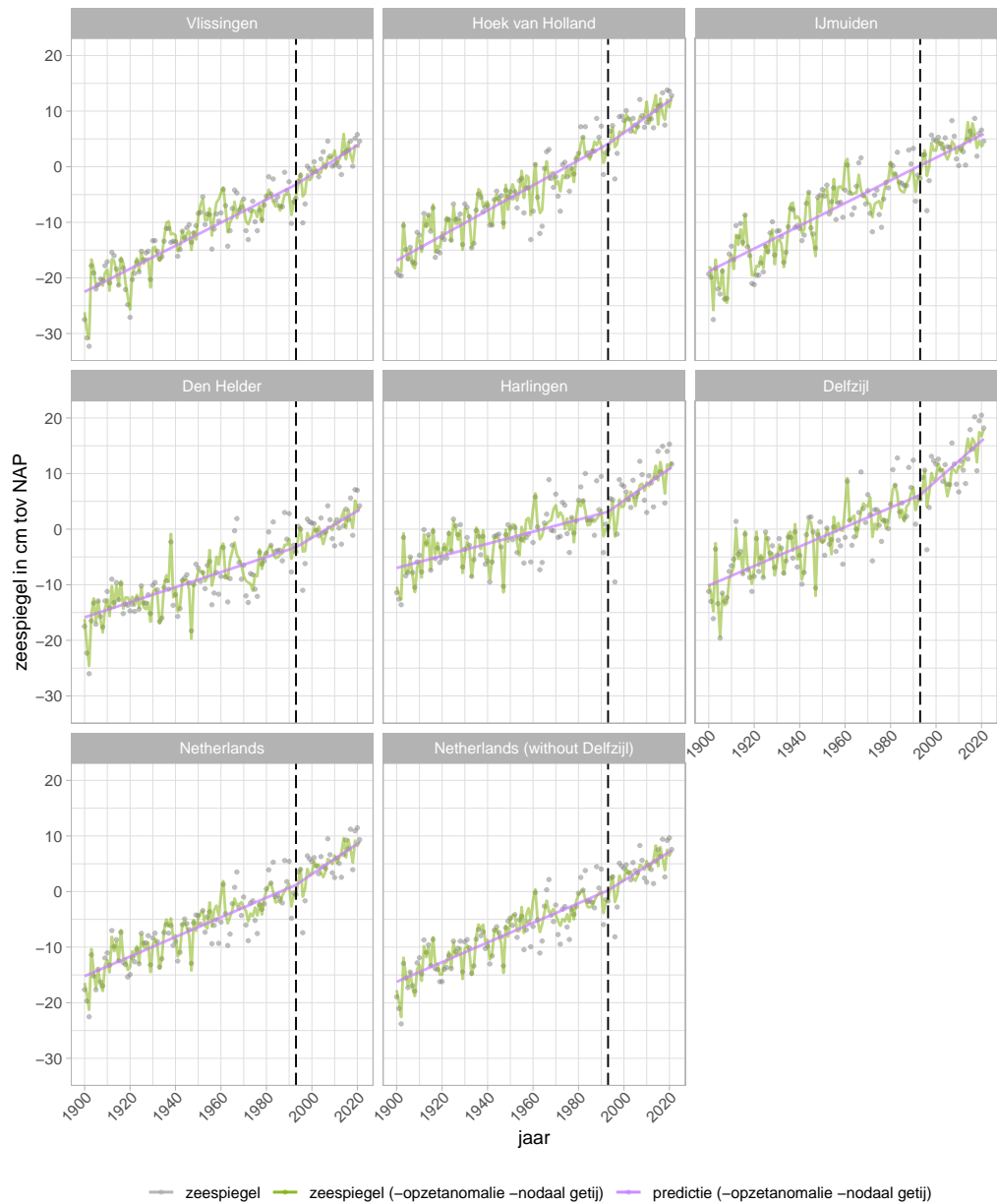
Figuur I.4 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (GTSM) en fits met het gebroken kwadratische model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met NCEP1



Figuur I.5 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het lineaire model voor alle stations.

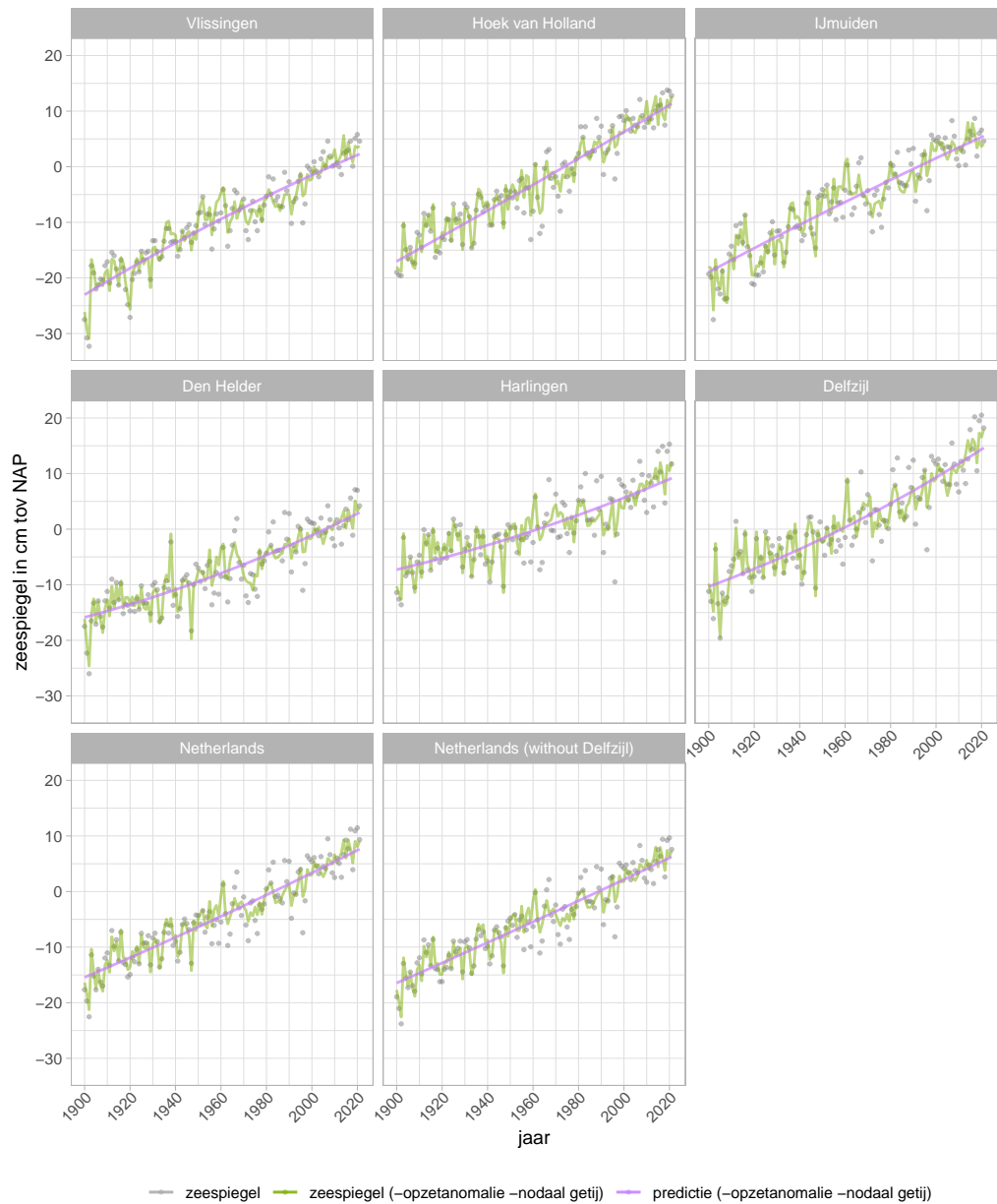
Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met NCEP1



Figuur I.6 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.

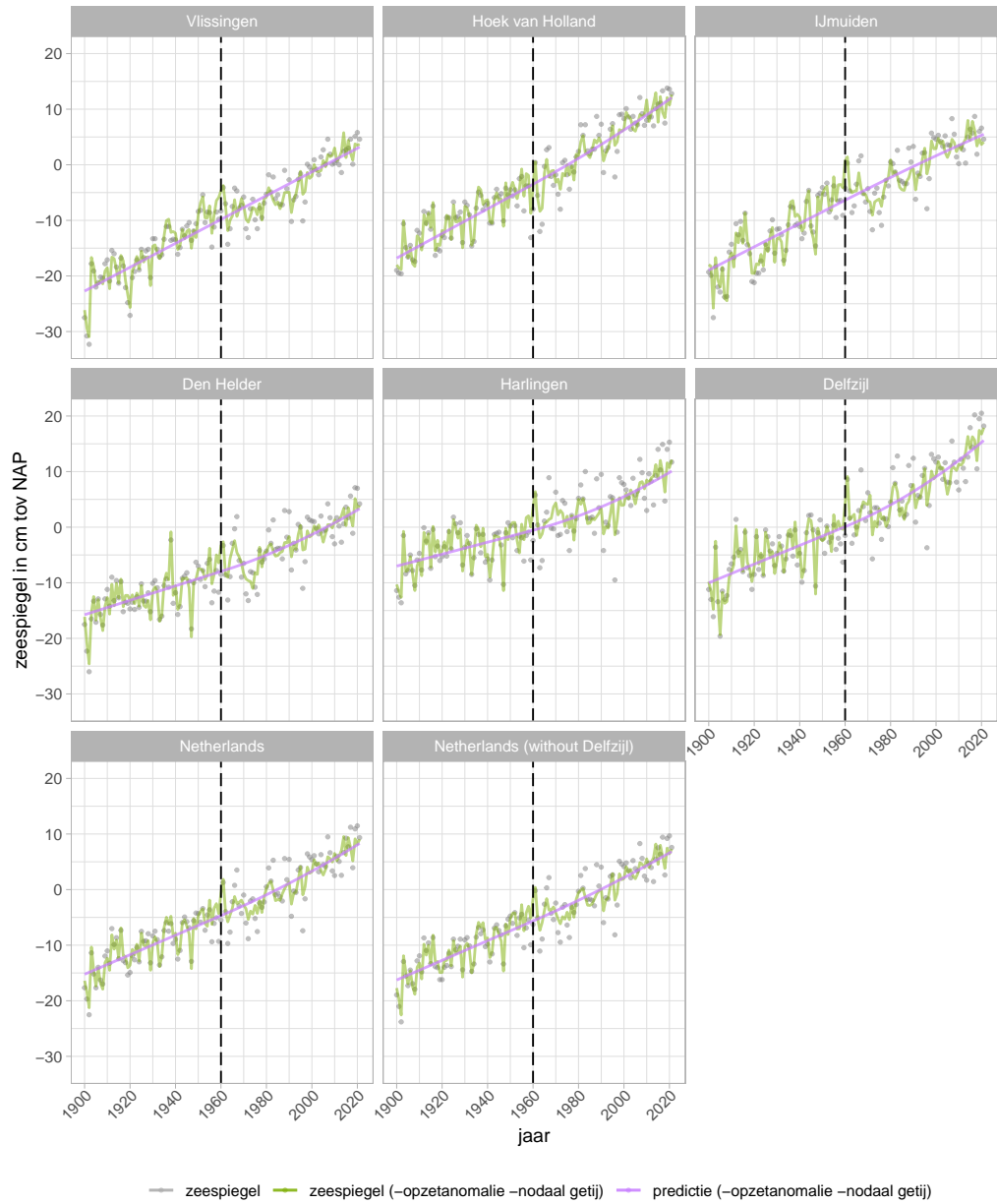


Zeespiegel en componenten voor modelvariant quadratic en gecorrigeerd voor wind of opzet met NCEP1



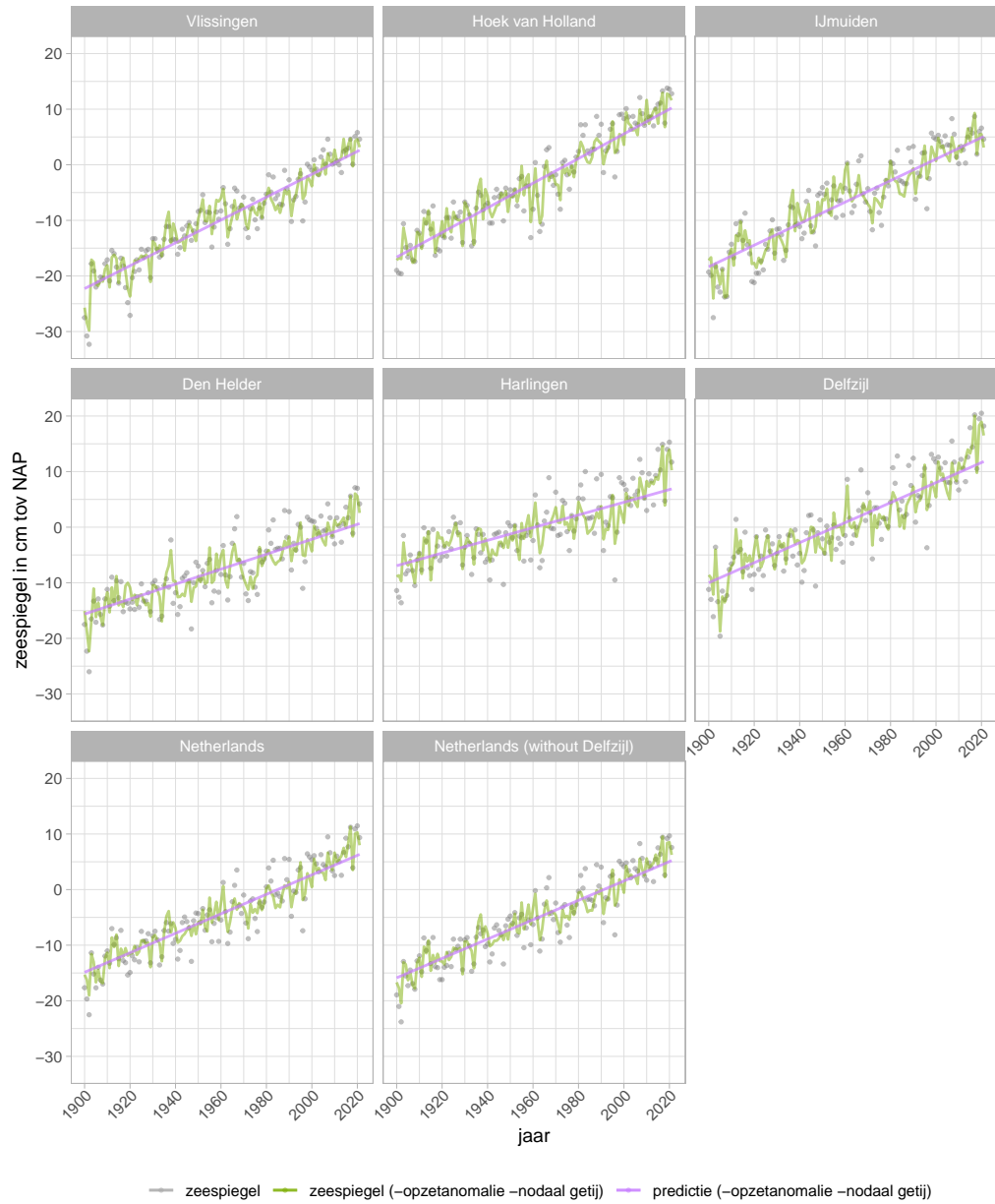
Figuur I.7 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het kwadratische model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_quadratic en gecorrigeerd voor wind of opzet met NCEP1



Figuur I.8 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (NCEP1) en fits met het gebroken kwadratische model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met 20CR



Figuur I.9 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het lineaire model voor alle stations.

- I.1.10 20CR en gebroken lineair model**
- I.1.11 20CR en kwadratisch model**
- I.1.12 20CR en gebroken kwadratische model**
- I.1.13 Combined en lineaire model**

Combined windopzet is een combinatie van 20CR en vanaf 2018 NCEP1.

- I.1.14 Combined en gebroken lineaire model**
- I.1.15 Combined en kwadratisch model**
- I.1.16 Combined en gebroken kwadratisch model**
- I.1.17 Alle windopzet varianten**

De verschillende windopzetcorrecties varianten vertonen, behalve “combined”, een kleine negatieve trend over de periode 1980 - nu (figuur I.17). Het verschil tussen de verschillende varianten (behalve combined) is echter nauwelijks waarneembaar.

#### **I.1.18 Nodaal getij**

De amplitude van het geschatte nodaal getij verschilt vooral per station (figuur I.18), en iets minder per opzetcorrectievariant. Er is ook een klein verschil in fase tussen de windopzetcorrecties, GTSM en NCEP1 enerzijds, en 20CR en Combined anderszijds. Er lijkt nauwelijks verschil te zijn in nodaal getij tussen de verschillende modelvarianten. Op dit moment is het nodaal getij op weg naar een nieuw maximum. We verwachten dat door het nodaal getij de zeespiegel nog ongeveer 3 (Hoek van Holland) tot 17 (IJmuiden) *mm* zal stijgen de komende jaren, waarna dit effect weer zal afnemen.

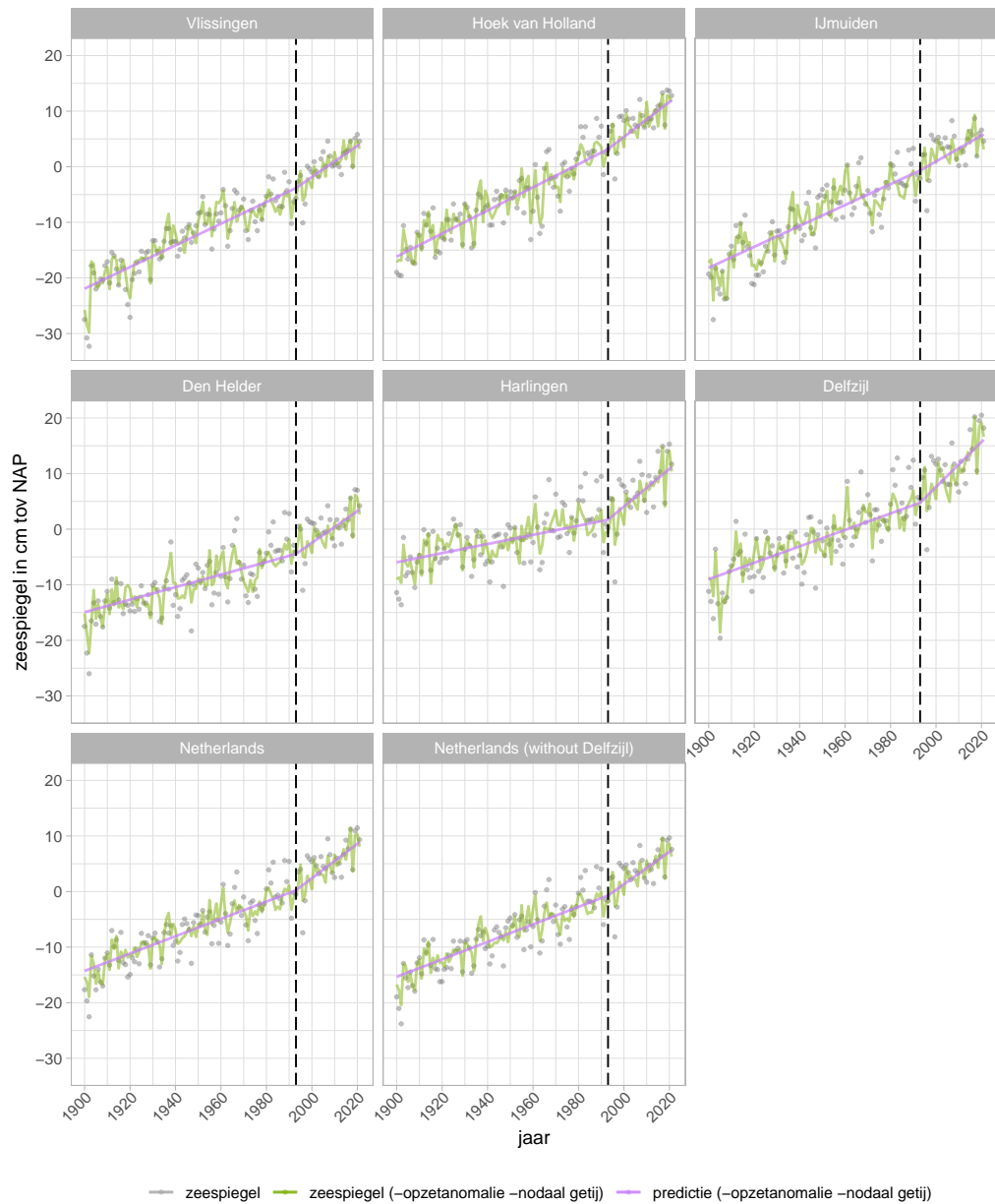
#### **I.1.19 Effect van modelkeuze op de huidige trend.**

## **I.2 Vergelijking van de trends tussen stations, en tussen de verschillende methoden**

In figuur I.20 is de trend (zeespiegelstijging) uitgezet tegen de tijd voor alle combinaties van modelvariant, windopzetvariant en voor alle stations. Het laat zien dat er grote verschillen zijn tussen de stations. Wat gemeenschappelijk is voor alle stations is dat zowel het gebroken lineaire als het gebroken kwadratische model op een vergelijkbare huidige zeespiegelstijging uitkomt voor 2021. De stijging die geschat wordt met het lineaire model en het kwadratische model komen lager uit.

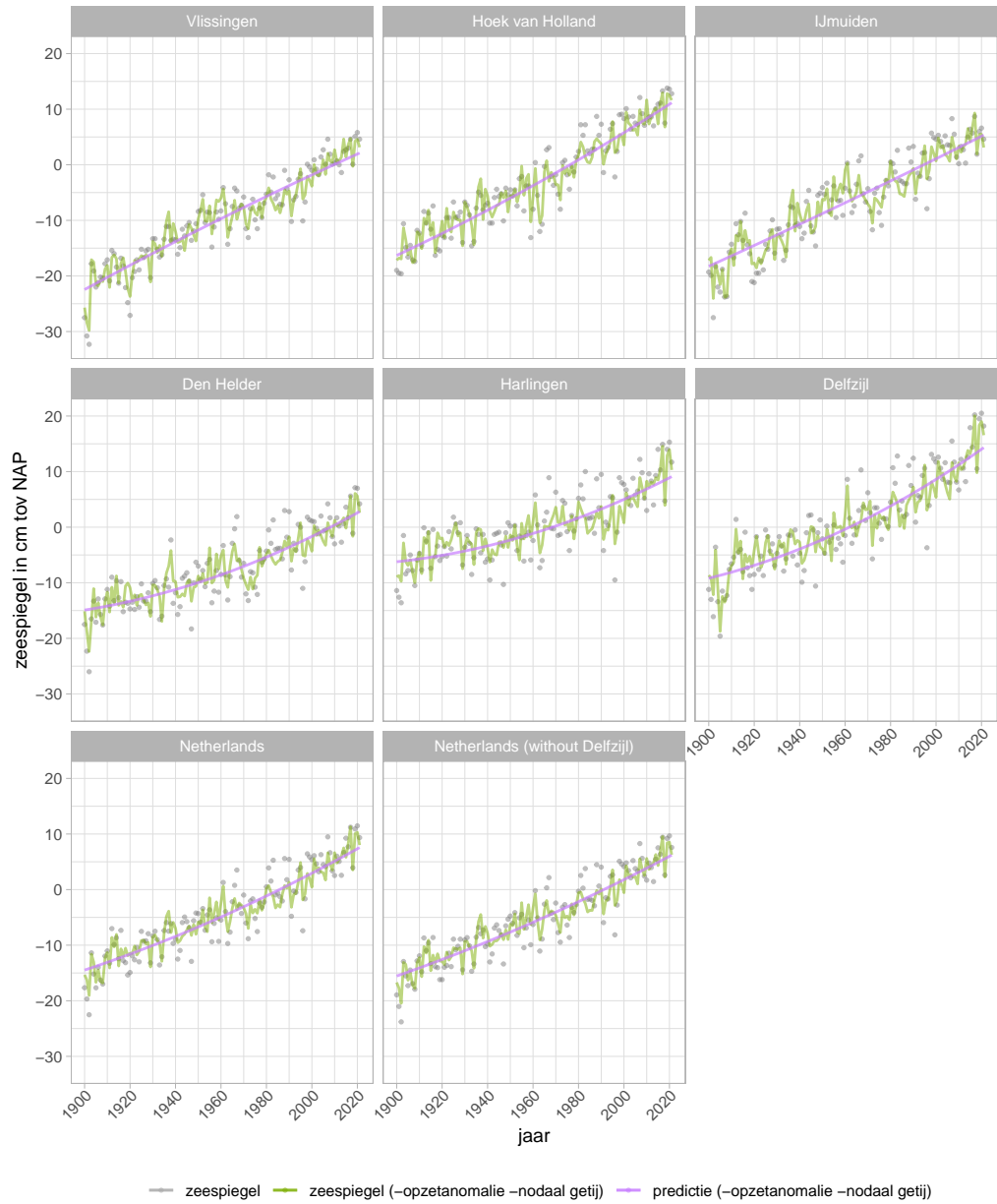
In figuur I.21 worden de trends voor gebroken lineaire fit voor de verschillende varianten van windopzet met elkaar vergeleken. Het patroon is voor alle windopzetvarianten gelijk. Het kleinste verschil tussen de trend voor en na 1993 wordt gevonden bij station IJmuiden. Bij gebruik van NCEP1 is er zelfs geen zichtbare knik bij dat station. Het grootste verschil in trend voor en na 1993 wordt gevonden bij de stations in en in de buurt van de Waddenzee, Delfzijl, Harlingen, en in mindere mate Den Helder.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met 20CR



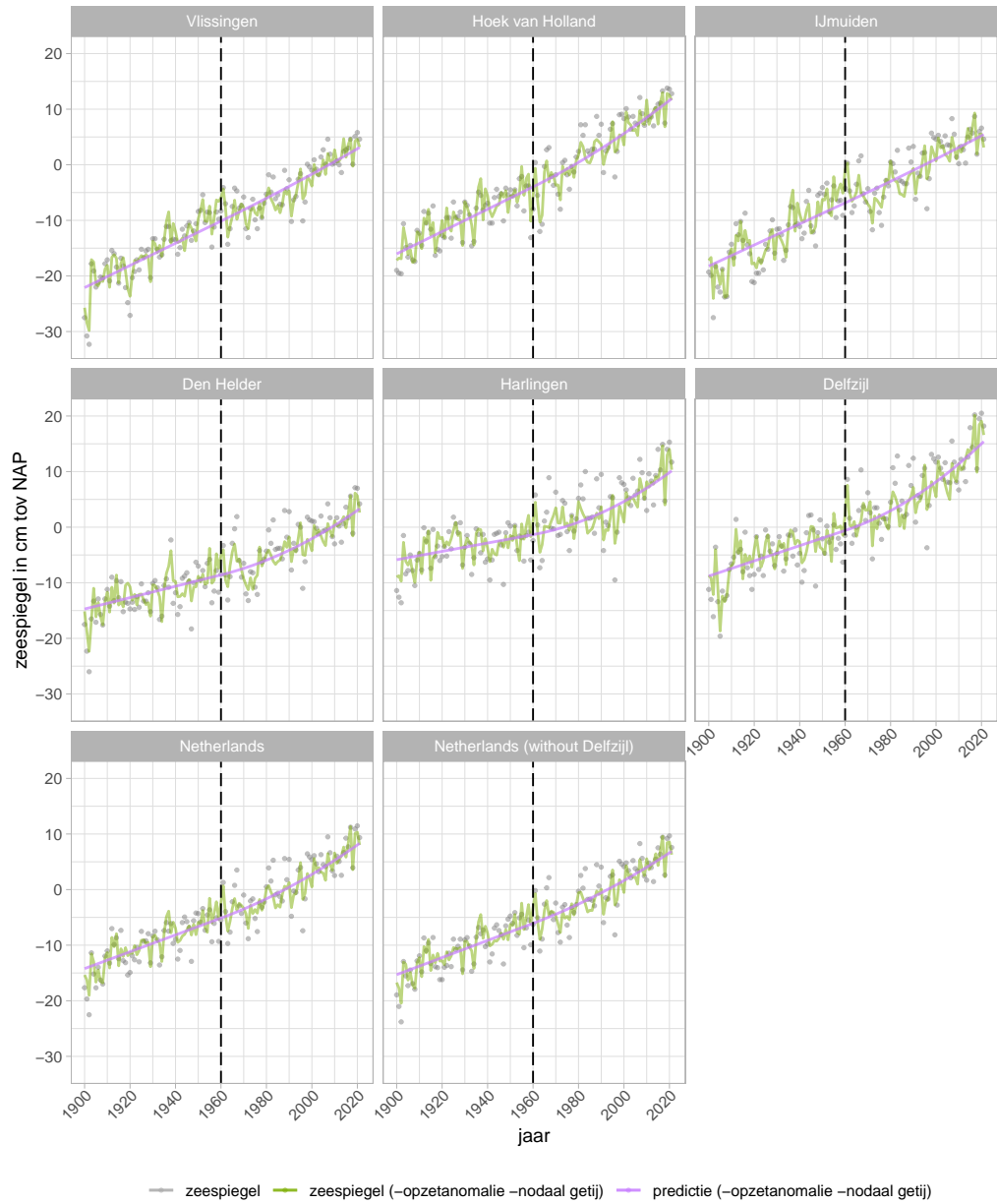
Figuur I.10 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant quadratic en gecorrigeerd voor wind of opzet met 20CR



Figuur I.11 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het kwadratische model voor alle stations.

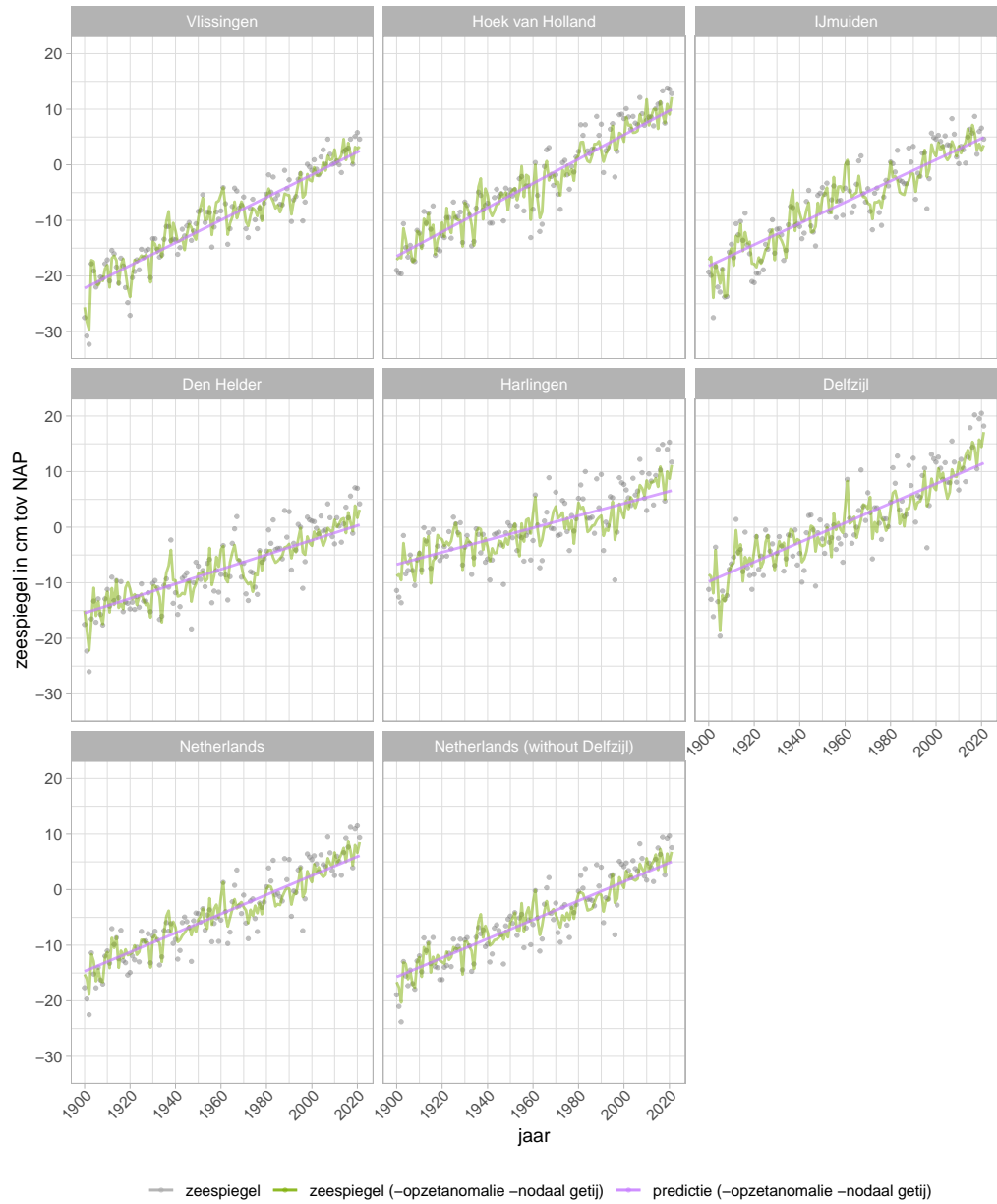
Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_quadratic en gecorrigeerd voor wind of opzet met 20CR



Figuur I.12 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken quadratische model voor alle stations.

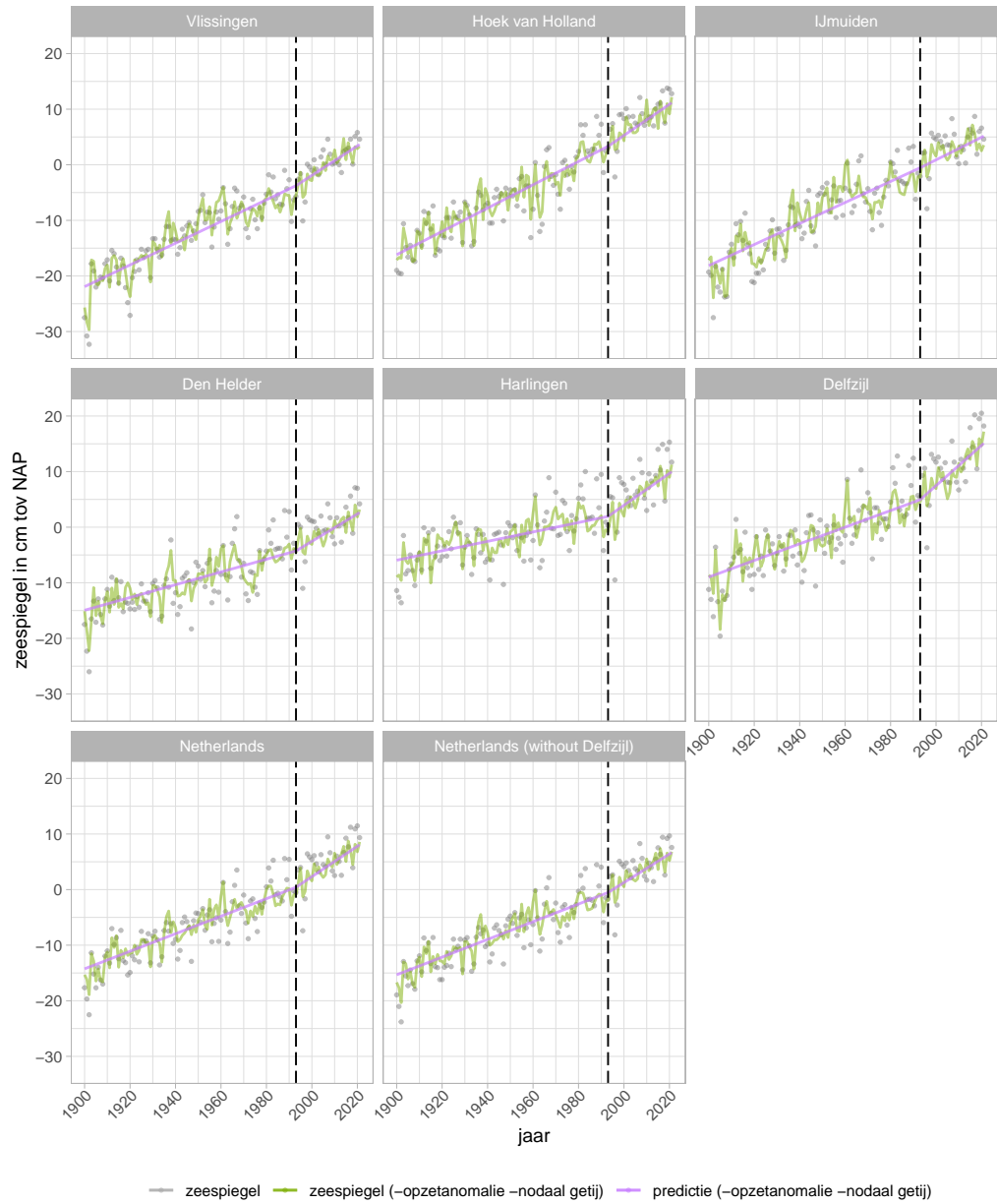


Zeespiegel en componenten voor modelvariant linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met Combined



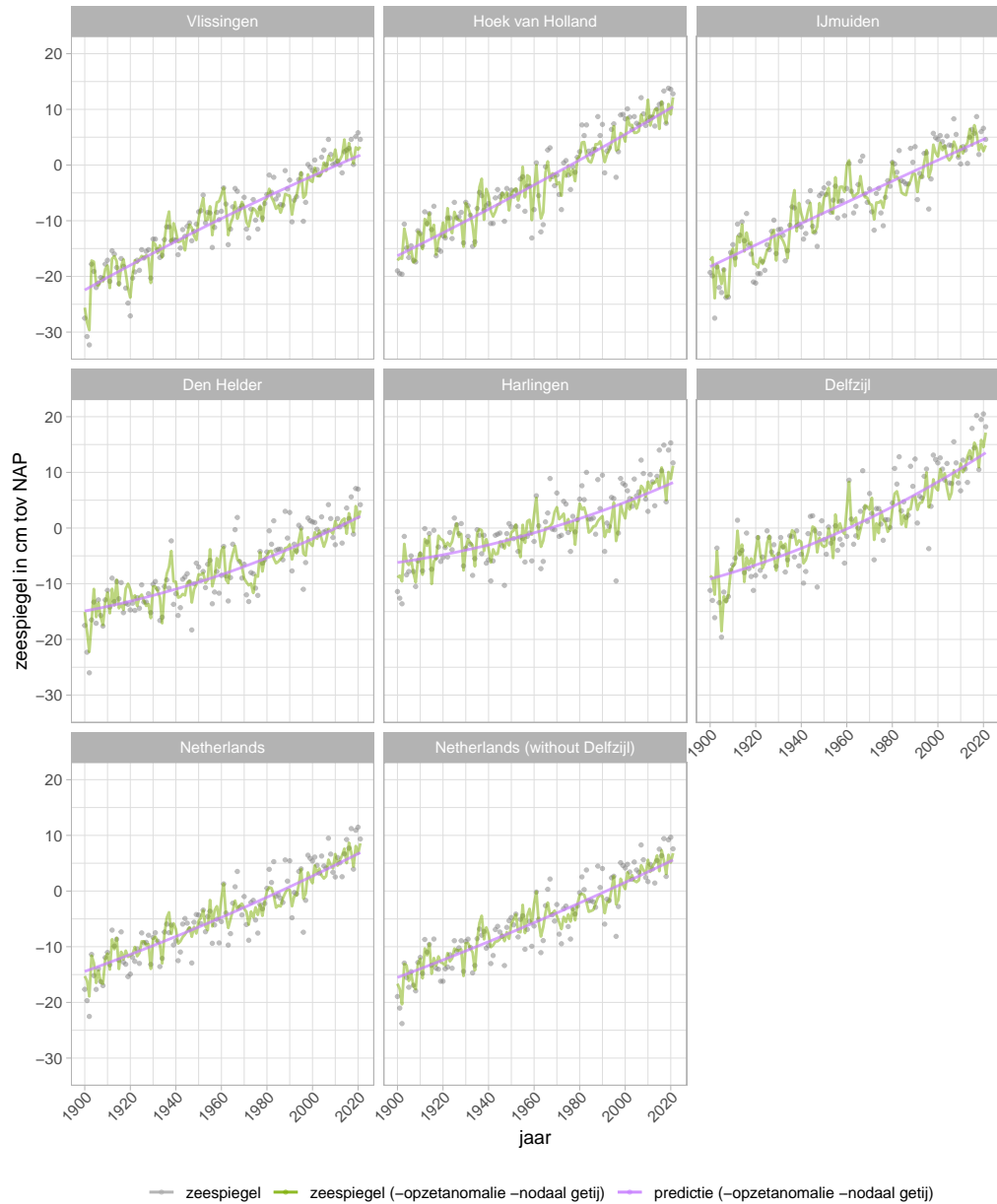
Figuur I.13 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het lineaire model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_linear en gecorrigeerd voor wind of opzet met Combined



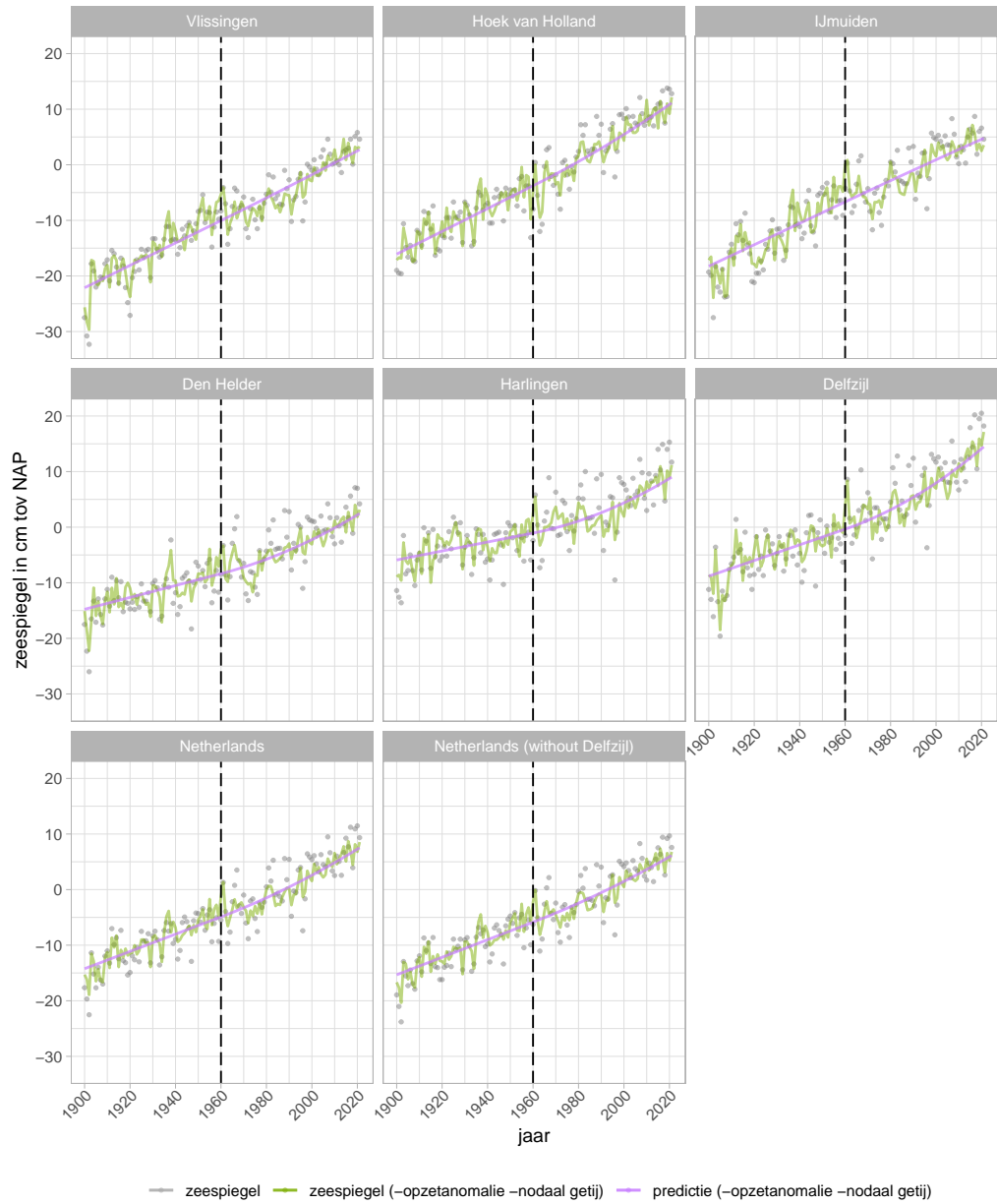
Figuur I.14 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken lineaire model voor alle stations.

Zeespiegel en componenten voor modelvariant kwadratisch en gecorrigeerd voor wind of opzet met Combined

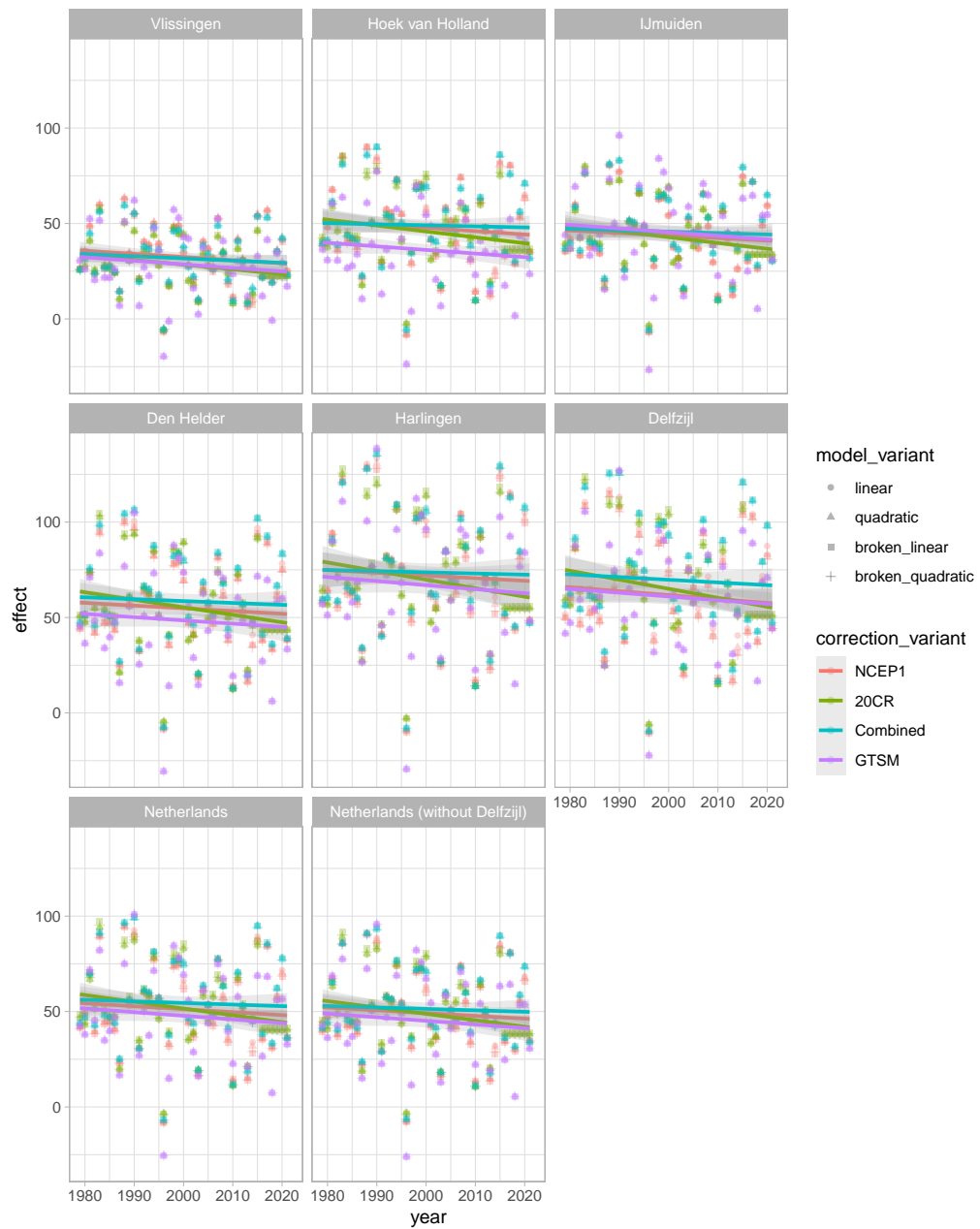


Figuur I.15 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het kwadratische model voor alle stations.

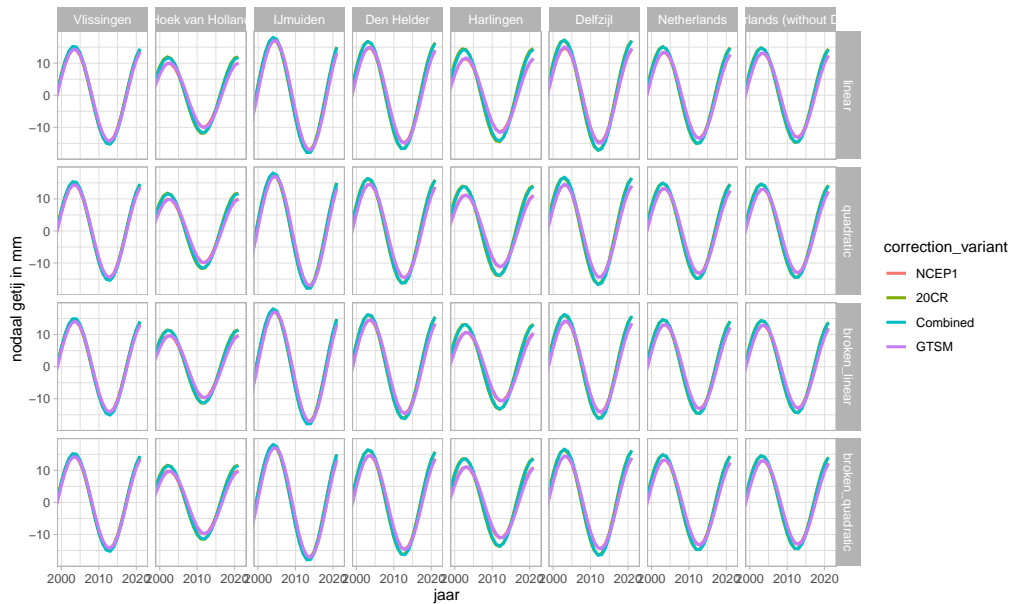
Zeespiegel en componenten voor modelvariant broken\_quadratic en gecorrigeerd voor wind of opzet met Combined



Figuur I.16 Zeespiegelmetingen (jaargemiddelde, correcties voor wind of opzet (20CR) en fits met het gebroken kwadratische model voor alle stations.

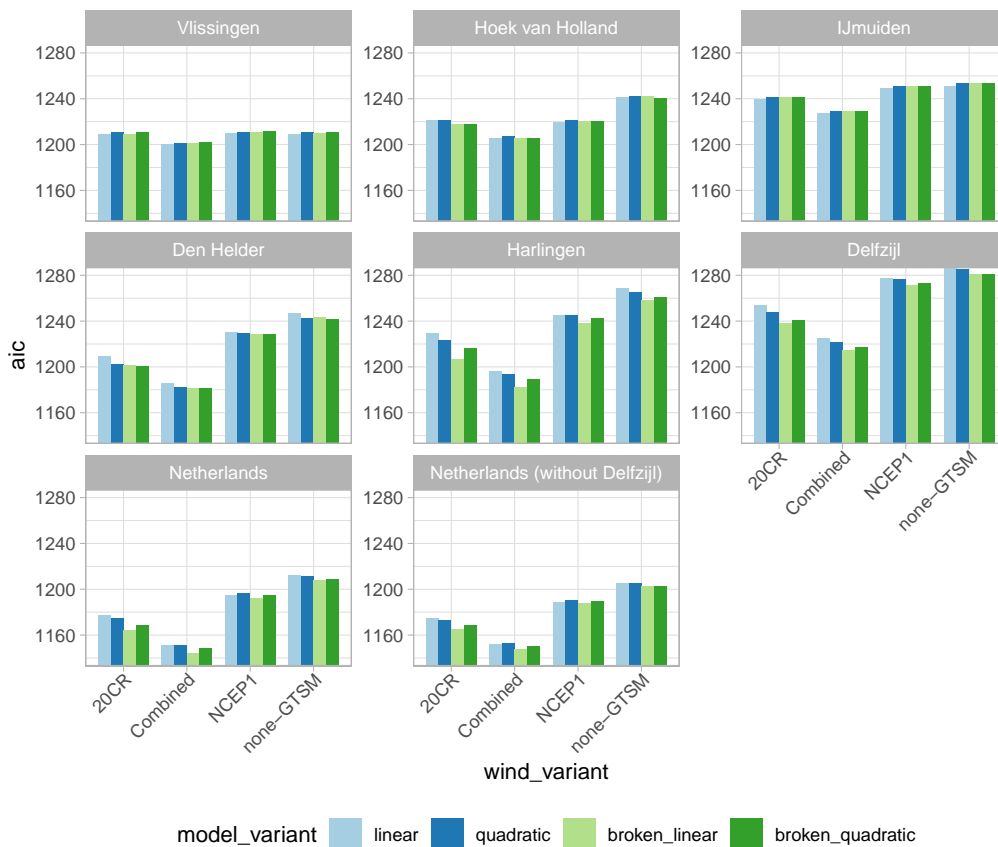


Figuur I.17 Windopzet berekend met GTSM en geschat met de verschillende wind heranalyses en modelvarianten met predictieinterval.



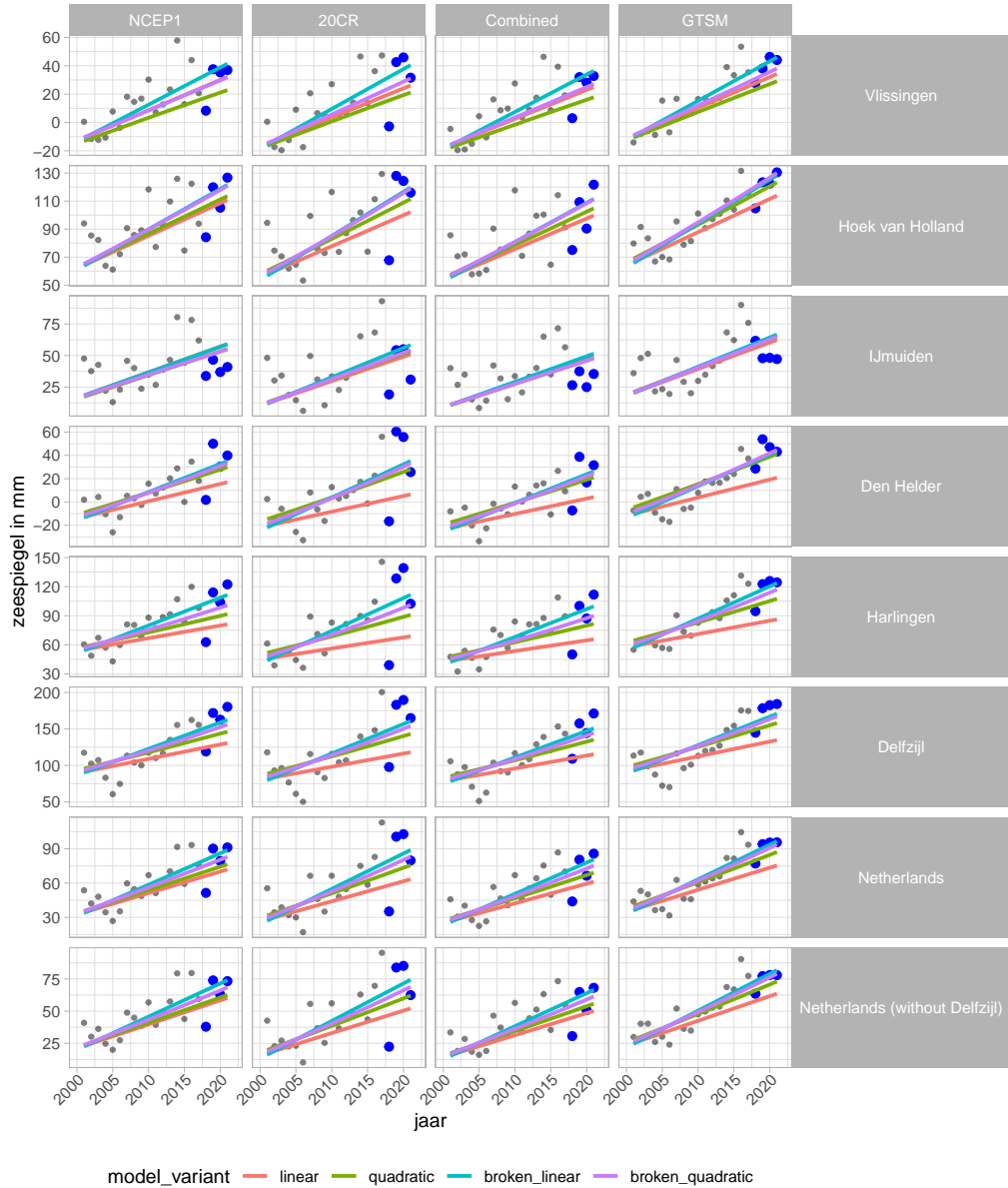
Figuur I.18 Geschat nodaal getij voor alle varianten. Alleen de periode vanaf 2000 wordt getoond om de verschillen in fase beter te kunnen zien. De amplitude en fase zijn over de hele periode constant.

### I.3 AIC bij gebruik van wind correcties



### Gemeten en geschatte zeespiegel

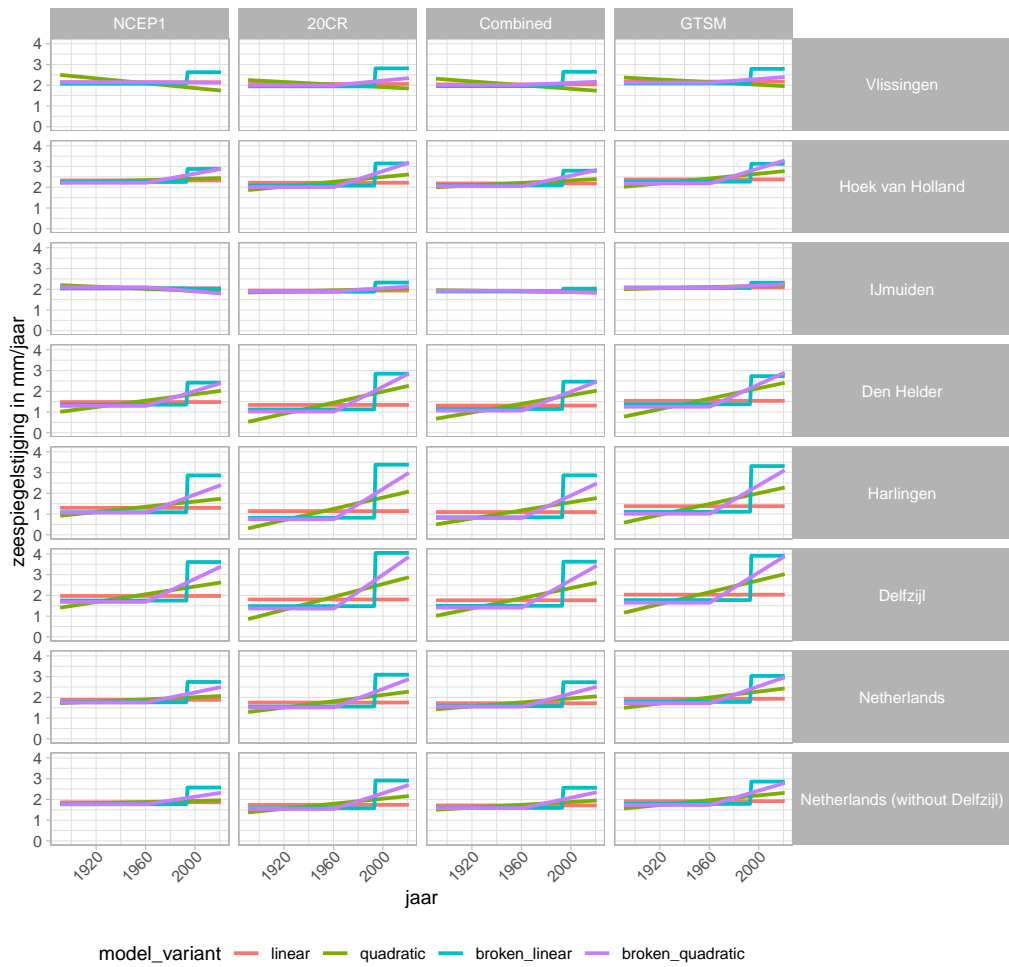
GTSM versie is zeespiegel minus opzetafwijking, blauwe punten zijn van na 2017



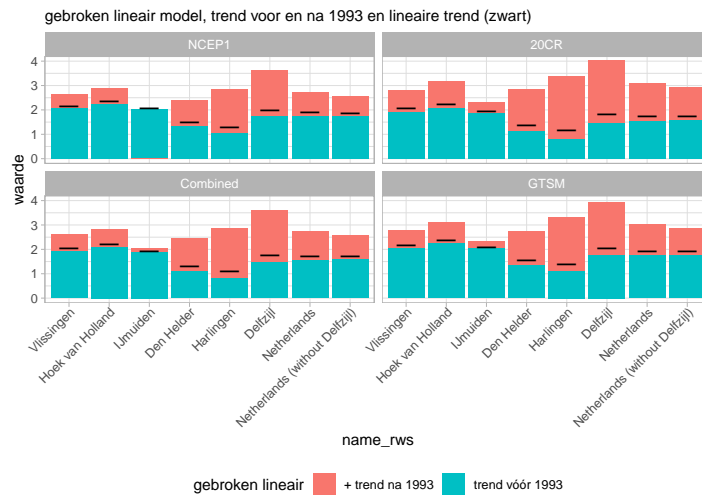
Figuur I.19 Schatting van de huidige zeespiegel en trend voor alle stations, windopzetcorrecties en modelkeuzen.



### Gemeten en geschatte zeespiegelstijging



Figuur I.20 Vergelijking tussen de zeespiegelstijging vanaf 1979 voor alle stations, windopzet-correcties en modelkeuzen.



Figuur I.21 Berekende trends voor het lineaire model (zwarte punten), en de pre- en post-1993 trend voor het broken linear model (kolommen).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)