

# Deltares

Enabling Delta Life



Royal Netherlands  
Meteorological Institute  
Ministry of Infrastructure and the  
Environment

**HKV**  
LIJN IN WATER

## **Zeespiegelmonitor 2014**

**Rekenmethode voor huidige en toekomstige  
zeespiegelstijging**





**Titel**  
Zeespiegelmonitor 2014

<b>Opdrachtgever</b> Rijkswaterstaat	<b>Project</b> 1209426.202	<b>Kenmerk</b> 1209426-000-VEB-0011	<b>Pagina's</b> 44
---	-------------------------------	--	-----------------------

**Trefwoorden**  
Zeespiegel Suppletiebeleid KPP

## Samenvatting



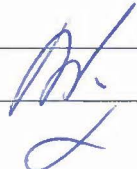
Dit rapport beschrijft de methode om de huidige zeespiegel te beschrijven. De methode is veranderd ten opzichte van de vorige methode doordat het statistisch model gebruik maakt van de heranalyse van wind gegevens en rekening houdt met mogelijke niet-lineaire zeespiegelstijging. De methode combineert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

## Referenties

KPP-2014 – Kust niet DP

<u>Versie</u>	<u>Datum</u>	<u>Auteur</u>	<u>Paraaf</u>	<u>Review</u>	<u>Paraaf</u>	<u>Goedkeuring</u>	<u>Paraaf</u>
0.1	2014-10-15	Fedor Baart		Joost Stronkhorst		Rinus Vis	
0.2	2014-11-15	Fedor Baart		Joost Stronkhorst		Rinus Vis	
1.0	2015-02-10	Fedor Baart		Joost Stronkhorst		Rinus Vis	

## Status

Finale versie



# Deltares

## **Zeespiegelmonitor 2014**

**Rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging.**

Fedor Baart (Deltares),  
Robert Leander (Deltares),  
John de Ronde (Deltares),  
Hylke de Vries (KNMI),  
Vincent Vuik (HKV),  
Robin Nicolai (HKV)

# Deltares

Deltares, 2015

**Titel**

Zeespiegelmonitor 2014

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat	1209426.202	1209426-000-VEB-0011	44

**Trefwoorden**

Zeespiegel Suppletiebeleid KPP

**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 analyse 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.

**Referenties**

KPP 2014 - Kust niet DP

<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteur</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Review</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Goedkeuring</b>	<b>Paraaf</b>
0.1	2014-10-15	Fedor Baart		Joost Stronkhorst		Rinus Vis	
0.2	2014-11-15	Fedor Baart		Joost Stronkhorst		Rinus Vis	
1.0	2015-02-10	Fedor Baart		Joost Stronkhorst		Rinus Vis	

**Status**

Finale versie

# Deltares



## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Aansluiting bij eerder onderzoek . . . . .	1
1.2	Onderzoeksvragen . . . . .	2
1.3	Aanpak . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Beleidsmatige toepassing zeespiegelstijging</b>	<b>3</b>
2.1	Absoluut versus relatief . . . . .	3
2.2	Huidige zeespiegel . . . . .	4
2.3	Huidige zeespiegelstijging . . . . .	5
2.4	Toekomstige zeespiegel . . . . .	6
2.5	Uitsplitsen . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Effect van wind op de zeespiegeltrend</b>	<b>9</b>
3.1	Aanleiding en probleemstelling . . . . .	9
3.1.1	Met of zonder wind trend? . . . . .	10
3.2	20th century reanalysis version 2 . . . . .	10
3.3	Vergelijking tijdseries 20th century reanalysis v2 en KNMI-station De Kooij . . . .	11
3.4	Resultaten . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Betrouwbaarheid van het statistisch model</b>	<b>17</b>
4.1	Aanleiding en doelstellingen . . . . .	17
4.2	Gegevens . . . . .	17
4.3	Statistisch model . . . . .	18
4.4	Voorspelling . . . . .	19
4.5	Betrouwbaarheids- en predictie-intervallen zeespiegel . . . . .	20
4.6	Toepassing . . . . .	20
4.7	Stijgsnelheid zeespiegel . . . . .	22
4.8	Aanbevelingen . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Combinatie van modellen</b>	<b>25</b>
5.1	Methoden om theorie en waarnemingen te combineren . . . . .	26
5.2	Conflatie . . . . .	27
5.3	Toepassing . . . . .	28
5.4	Conclusie . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Frequentie zeespiegel kengetallen</b>	<b>31</b>
6.1	Invoer gegevens . . . . .	32
6.2	Overwegingen . . . . .	32
6.3	Aanbeveling . . . . .	32
<b>7</b>	<b>Kennisontsluiting</b>	<b>33</b>
7.1	Advies . . . . .	35
<b>8</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>Literatuur</b>	<b>39</b>

# Deltares

## Lijst van figuren

2.1	Absoluut versus relatief . . . . .	3
2.2	Lokaal gereviseerd . . . . .	5
3.1	Locatie wind . . . . .	11
3.2	De Kooij versus wind heranalyse . . . . .	12
3.3	De Kooij versus luchtdruk heranalyse . . . . .	12
3.4	De Kooij versus wind heranalyse . . . . .	13
3.5	De Kooij versus luchtdruk heranalyse . . . . .	13
3.6	Jaargemiddelde waterstand met en zonder correcties . . . . .	14
4.1	Lineair model, Amsterdam . . . . .	19
4.2	Lineair model, betrouwbaarheid . . . . .	21
4.3	LOESS toegepast op residuen . . . . .	21
4.4	Statistisch model . . . . .	22
5.1	Fysisch model . . . . .	26
5.2	Samenvoeging . . . . .	29

# Deltares

## Lijst van tabellen

3.1	Zeespiegelstijging op basis van De Kooij versus reanalysis . . . . .	15
4.1	Zeespiegelstijging lineair model . . . . .	22
4.2	Zeespiegelstijging lineair model . . . . .	23

# Deltares

## 1 Inleiding

Het handhaven van de kustlijn en het handhaven van het kustfundament zijn twee belangrijke pijlers van het landelijke kustbeleid, de 3e kustnota ([Rijkswaterstaat, 2000](#)), nota ruimte ([VROM, 2004](#)), het nationaal waterplan ([Verkeer en Waterstaat, 2008](#)), de Nationale Visie Kust en Beslissing Zand ([Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken, 2013, 2014](#)).

Handhaven wordt uitgevoerd in de vorm van morfologische interventies met behulp van zand-suppleties.

Het benodigde zandvolume wordt voor een belangrijk deel bepaald door het oppervlak van een deel van het kustfundament maal de zeespiegelstijging. Voor elke millimeter per jaar zeespiegelstijging wordt 7 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd ([De Ronde, 2008](#)). Er wordt naar gestreefd ([Verkeer en Waterstaat, 2008](#)) het gehele kustfundament, inclusief de landzijde mee te laten groeien. De directe koppeling tussen kustfundament, zeespiegelstijging en suppleervolume maken het doelmatig suppleren en de precieze bepaling van de zeespiegelstijging en het kustfundament tot relevante onderzoeksthema's.

### 1.1 Aansluiting bij eerder onderzoek

Nederland kent een lange geschiedenis in het systematisch meten van de zeespiegel (uurlijks sinds 1700) en de zeebodem en kusttopografie (jaarlijks sinds 1964). Deze metingen hebben bijgedragen aan doelmatig en "evidence based" kustbeheer. In die lijn passen ook de onderzoeken, waar dit een vervolg op is, van [Dillingh et al. \(2010\)](#) en [De Ronde et al. \(2013\)](#).

In [Dillingh et al. \(2010\)](#) werd een eerste definitie gegeven van de zeespiegelstijging in de context van het suppletie beleid. Er werd bepaald dat rekening gehouden moet worden met datum verandering (NAP-correctie) en met fysische processen (nodaal getij, luchtdruk). Er werd gevonden dat er geen statistisch aantoonbare versnelling in de zeespiegelstijging plaatsvindt. 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 in principe toeneemt. Daarnaast werd een eerste koppeling gemaakt tussen de zeespiegel observaties (het statistische model) en de zeespiegel projecties van de Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) (het fysische model). Ten slotte hebben [Dillingh et al. \(2010\)](#) de satelliet metingen van de absolute zeespiegel vergeleken met de metingen van de getijstations.

[De Ronde et al. \(2013\)](#) hadden als doel om de schatting nog 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 zeespiegel eigenlijk te laag is ingeschat. Op deze vraag wordt in hoofdstuk 3 antwoord gegeven. De exploratieve methode werd verder uitgewerkt. Hoofdstuk 4 gaat hier op verder. De satellietmetingen werden in meer detail bekeken. [De Ronde et al. \(2013\)](#) 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 de

schattingen gebaseerd op het fysische model en de schattingen gebaseerd op het statistische model te combineren.

## 1.2 Onderzoeksvragen

Dit rapport heeft als doel de volgende centrale vraagstellingen te beantwoorden:

- 1 Wat is een goede maat voor de huidige zeespiegelstijging ten behoeve het suppletieprogramma en de suppletiebehoefte? (antwoord op pagina 23)
- 2 Welke toekomstige zeespiegel kan het best worden gebruikt ten behoeve van dijkversterkingen? (antwoord op pagina 29)
- 3 Hoe kan de methode voor huidige zeespiegelstijging aansluiten bij de scenario's? (antwoord op pagina 29)

## 1.3 Aanpak

Om deze vragen te beantwoorden, wordt eerst in detail bekeken welke zeespiegel kengetallen aansluiten bij de vraagstellingen in het beleid (hoofdstuk 2).

Een van de bijdragen van zeespiegelstijging is windopzet. De eerdere analyses van de relatie tussen wind en zeespiegelstand worden opnieuw gedaan met een betere dataset (hoofdstuk 3). Op basis van deze bevindingen wordt door de metingen een nieuwe trend gepast met bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen (hoofdstuk 4), hetgeen resulteert in een nieuwe versie van het *statistische model*.

Het KNMI heeft de klimaatscenario's vernieuwd met de laatste wetenschappelijke inzichten. De scenario's zijn een update van de voorgaande KNMI'06-scenario's. De KNMI'14-scenario's ([Van den Hurk et al., 2014](#)) vertalen de resultaten van het wereldwijde klimaat uit het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) rapport ([Stocker et al., 2013](#)) naar Nederland. Naar deze modelresultaten wordt verwezen als het *fysische model*.

Om de twee modellen (statistisch en fysisch) aan te laten sluiten worden ze gecombineerd. De methode die hiervoor gebruikt wordt (hoofdstuk 5) sluit beter aan bij de statistische praktijk dan de methode uit [Dillingh et al. \(2010\)](#). Het resultaat is een methode voor de bepaling de zeespiegelstijging die kan worden toegepast voor zowel vraag 1 als 2.

In aansluiting op een verbeterde methode wordt een herzieningsfrequentie aanbevolen (hoofdstuk 6). De herziening van het fysische model is in beheer bij het KNMI en volgt de herzieningsfrequentie van de IPCC. Voor de reproduceerbaarheid en kennisborging is de huidige kennis van het statistische model van de zeespiegel geborgd in een applicatie waar specialisten zelf mee kunnen rekenen. In hoofdstuk 7 wordt gekeken wat een logische plek zou zijn om deze en vergelijkbare "viewers" in onder te brengen.



## 2 Beleidsmatige toepassing zeespiegelstijging

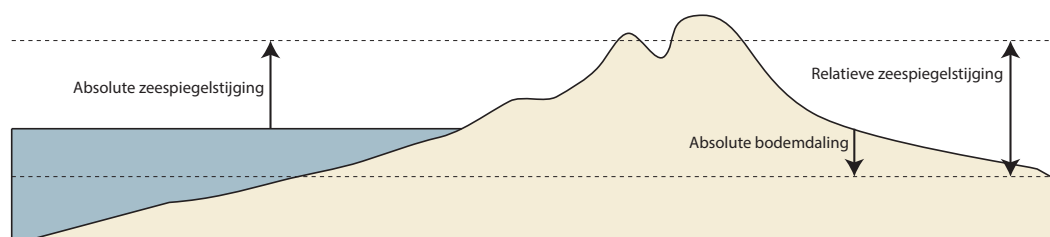
De zeespiegelstand, trend en de toekomstige zeespiegel sluit op meerdere plekken aan bij de primaire processen van Rijkswaterstaat (RWS) en de waterschappen.

- 1 De huidige *stand* van de relatieve zeespiegel. De stand van de zeespiegel ten opzichte van het Normaal Amsterdams Peil (NAP) wordt gebruikt om het huidige niveau van waterveiligheid te bepalen.
- 2 De huidige *trend* in de relatieve zeespiegel. Het onderhoud van de kust wordt afgestemd met de huidige trend. De primaire taak van de overheid is om de kustlijn (sinds 1990) en het kustfundament (sinds 2001) in stand te houden, ([Rijkswaterstaat, 2000](#); [VROM, 2004](#)). De huidige aanpak is dat het kustfundament meegroeit met de zeespiegelstijging. Het benodigde zandvolume voor het meegroeien van het kustfundament is gelijk aan het oppervlak hiervan maal de zeespiegelstijging ([De Ronde, 2008](#)). Hier komen nog verliesposten bij doordat de Waddenzee en Westerschelde zelfstandig meegroeien, maar dit zand wordt onttrokken aan het kustfundament. Voor deze verliezen wordt gecompenseerd. De combinatie van het kustfundament en de Waddenzee en Westerschelde wordt het kuststelsel genoemd ([Nederbragt, 2005](#)).
- 3 De *toekomstige* relatieve zeespiegel wordt gebruikt voor ontwerp doeleinden. Voor kunstwerken (afwateringssluizen, dijk in duin constructies, keringen, overige dijkversterkingen) is het belangrijk dat zij gedurende de geplande levensduur niet vervangen hoeven te worden. De toekomstige zeespiegel wordt hierbij gebruikt. De levensduur van constructies is doorgaans in de orde van decaden.

### 2.1 Absoluut versus relatief

Uit bovenstaande sectie blijkt dat we voor beleid gebruik maken van de relatieve zeespiegel stijging, maar relatief ten opzichte van wat?

Met relatieve zeespiegel wordt bedoeld, hoeveel deze zeespiegel stijgt, ten opzichte van de bodem en is een som van hoeveel de zeespiegel stijgt ten opzichte van zichzelf en hoeveel de bodem daalt ten opzichte van zichzelf figuur 2.1.



Figuur 2.1: Absolute versus relatieve zeespiegelstijging en bodemdaling.

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

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

De relatie tussen de verschillende hoogte systemen is beschreven in ([De Bruijne and Voor Geodesie, 2005](#)).

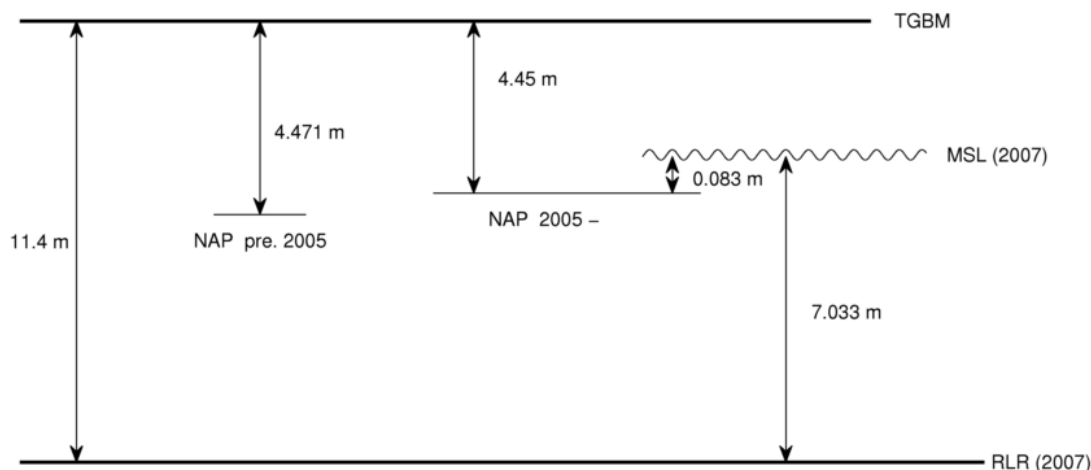
Voor het rekenen met zeespiegelstanden wordt gebruik gemaakt van een van een zogenaamd lokaal gerevisieerd hoogte niveau, in Nederland gebaseerd op het NAP. De details hiervan staan beschreven in [Dillingh et al. \(2010\)](#). De lokaal gerevisieerde hoogte gegevens worden opgeslagen en verspreid via de internationale dataset van getij metingen (Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)), zie bijvoorbeeld figuur 2.2. In dit rapport gebruiken we de waterstand ten opzichte van het post-2005 NAP

## 2.2 Huidige zeespiegel

De zeespiegel varieert door gebeurtenissen en continu variërende oorzaken (scheve opzet door stormen, luchtdruk verschillen, temperatuur veranderingen, tsunami's, scheepvaart, interventies in kust, aanpassing van datum), cyclische oorzaken (golven, getij, seizoenen, nodaal getij) en systematische veranderingen (Postglaciale bodembeweging (PGB), gravitatie- en klimaat verandering). Daarom wordt doorgaans gerekend met een gemiddelde zeespiegel. De verschillende gevolgen van klimaat verandering, smelten, dichtheidseffecten staan beschreven in [De Vries et al. \(2014\)](#).

In de laatste hydraulische randvoorwaarden voor de veiligheidsberekening ([Rijkswaterstaat, 2007](#)) is gekozen om niet met de gemiddelde zeespiegelstand te rekenen, maar met een regionaal variërende hoogwaterstand gebaseerd op de lineaire trend uit de hoogwaters over de periode 1985 - 2011 (lengte anderhalf keer de lengte van de nodale cyclus ter voorkoming van bias) en de stand van 1985. Bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden wordt een beperkte periode vooruit gekeken zodat de HR aan het einde van de toetsperiode valide zijn.

Het gebruik van regionaal verschillende standen ligt voor de hand. Zowel de gemiddelde zeespiegel als de getij amplitudes verschillen langs de Nederlandse kust ([De Ronde et al., 2013](#); [Hollebrandse, 2005](#)). Het is niet aangetoond dat lineaire trend in de hoog waters een goede



*Figuur 2.2: Gereviseerd lokaal hoogte niveau zoals in gebruik voor het station IJmuiden, bron PSMSL. Het niveau TGBM slaat op het referentie punt ten opzichte waarvan het getij wordt gemeten. Het niveau, RLR is ongeveer 7000mm onder het gemiddeld zeeniveau, een arbitrair gekozen referentie niveau waarbij jaar en maand gemiddelden positief zijn. Het gemiddeld zeeniveau voor 2007 is weergegeven, MSL. Het NAP is het nationale hoogte systeem. De aanpassing van het NAP is verwerkt door de PSMSL op de methode beschreven door [Dillingh et al. \(2010\)](#).*

voorspeller is voor de huidige hoogwater stijging. De grootste veranderingen in de getij constituenten zijn veroorzaakt door het sluiten van de Zuiderzee, en de diverse aanpassingen aan de havens en hebben dus een andere oorzaak dan de zeespiegel stijging. Het valt te overwegen om de huidige zeespiegel en de huidige getij constituenten apart te beschouwen en het huidige hoogwater niet te baseren op recente trends in hoogwaters.

### 2.3 Huidige zeespiegelstijging

Met de zeespiegelstijging in de context van het onderhoud van de kust wordt vaak bedoeld met de zeespiegelstijging zoals veroorzaakt door klimaatverandering en bodemdaling ([Verkeer en Waterstaat, 2008](#)). Deze spelen zich af op een schaal van decaden (klimaat  $\geq 30$ ) tot millenia en 'huidig' moet je daarom in deze context zien als de stijging die karakteristiek is voor meerdere decaden.

Dit is uitgewerkt ([Dillingh et al., 2010](#); [De Ronde et al., 2013](#)) in de vorm van een trend (statistische model) van de zeespiegel metingen van de getij stations hoofdstuk 4. Met dit model worden zowel de huidige stand als de trend bepaald.

De zeespiegelstijging zoals gemeten langs de Nederlandse kust komt overeen met de trend wereldwijd van 19cm over de 20e eeuw ([Jevrejeva et al., 2014](#)). Een recente versnelling is in Nederland niet geobserveerd. Uit satelliet metingen en reconstructies blijkt ([Jevrejeva et al., 2014](#); [Church and White, 2011](#)) een recente versnelling (sinds 1990). Analyse van individuele stations over de wereld laat geen versnelling zien ([Houston and Dean, 2011](#)).

Houston geeft aan dat deze discrepantie het gevolg is van een neiging is tot overschatting van de zeespiegel vanwege budgettaire overwegingen ([Phillips, 2012](#)). De verschillende partijen beschuldigen elkaar van "cherry-picking", selectief data rapporteren om een standpunt te onder-

bouwen (Rahmstorf and Vermeer, 2011).

De sterke koppeling tussen budgetten (Delta Programma, kustbeheer, onderzoeksprogramma's) aan een enkel kengetal (zeespiegelstijging) dat ook vrij makkelijk beïnvloedbaar is door keuzes in rekenmethode (begin, eind, parameters, model) maakt de kans op subjectief rekenen groot.

Baart *et al.* (2012) geven een overzicht van deze discussie en de bijbehorende methodologische overwegingen. Concreet wordt er in dit rapport rekening mee gehouden door een vaste begin periode (1890) en set met stations (6 hoofdstations) te kiezen, geen gesegmenteerde trends de berekenen en de resultaten van verschillende modellen te combineren.

Bij het bepalen van de veiligheid op basis van de gemiddelde zeespiegelstand en getij amplitude wordt gerekend met lokale verschillen. Het meegroeien van de kust in evenwicht met de zeespiegelstijging is landelijke beleid. Vandaar dat voor het meegroeien gebruik wordt gemaakt van een zeespiegeltrend gemiddeld over de zes hoofdstations. De analyse van de afzonderlijke stations wordt periodiek bekeken en is onderdeel van de tool, beschreven in hoofdstuk 7.

## 2.4 Toekomstige zeespiegel

Voor de toets op houdbaarheid van suppletiebeleid is gerekend met het hoogste plausible scenario (DeltaCommissie). Het laagst plausible scenario heeft zijn weg nog niet gevonden in beleidstoepassingen.

Scenario's van de toekomstige ontwikkeling van de zeespiegel worden al lange tijd gebruikt in beleid. Zo werd in de eerste Delta commissie de zeespiegel verwachting (toen 70cm/eeuw) gebruikt om een economische optimale dijkhoogte te berekenen.

Ook wordt de toekomstige zeespiegel vaak in politieke discussie gebruikt. In 1965 gaf Gerard Nederhorst (fractievoorzitter Partij van de Arbeid (PVDa)) tijdens de algemene beschouwingen aan "in het jaar 2000 zullen we weten hoe ver de mens kan gaan met het ingrijpen in zijn eigen levensvoorwaarden ... wanneer men het ijs zou laten smelten met alle gevolgen voor de bewoonbare ruimte". Ook toen was de toekomstige zeespiegelversnelling, veroorzaakt door de mens, al een thema. De zeespiegel is 50 jaar later 10 centimeter gestegen. De projectie van versnelling is verschoven.

Sinds de jaren tachtig wordt het voorzorgsprincipe toegepast op vraagstukken waarbij een gevaar dreigt en sprake is van een onzekerheid. In de vergadering over de wet opslag duurzame energie van 28 november 2012 gebruikt Minister Kamp een zeespiegel scenario als volgt: "Op dit moment wordt ons voorspeld dat er in een eeuw tijd een zeespiegelstijging van 1 meter zal zijn. ... Stel nu dat op een gegeven moment blijkt dat het echt naar de verkeerde kant doorslaat en we er helemaal niets aan hebben gedaan omdat we alles maar flauwekul vonden en geen kosten wilden maken. Dan zijn de bedrijven in Nederland pas echt slecht uit.". Hierbij valt op dat de zeespiegel scenario's (het zou kunnen dat) in de politieke arena van vorm verandert naar een zeespiegel waarzeggerij (het zal zijn).

De termen voorspellingen, scenario's, projecties, verwachtingen worden vaak door elkaar gebruikt. Hier hanteren we de volgende definities:

**scenario** Een representatie van een mogelijke toekomstige ontwikkeling.

**projectie** Een representatie van een plausibele toekomstige ontwikkeling.

**verwachting** Een representatie van de meest waarschijnlijke toekomstige ontwikkeling.

**voorspelling** Een representatie van een toekomstige ontwikkeling met een schatting van de waarschijnlijkheid.

Andere gebruikte termen in deze context zijn prognoses, ramingen, vooruitzichten, waarzeggerij en toekomstperspectieven. Het is aan te bevelen om in het beleid consistente termen voor de verschillende voorspelvormen te gebruiken zodat er bij de verantwoordelijke verantwoordelijken geen verwarring hoeft te ontstaan.

De KNMI'14 zeespiegel-scenarios zijn geconstrueerd op basis van twee mogelijke ontwikkelingen van de wereld-gemiddelde temperatuur (i.e. temperatuur paden). In het ene scenario ("W") warmt de aarde meer op dan in het andere ("G"). Voor ieder van deze twee temperatuurs-paden verkrijgen we door inachtneming van zowel onzekerheden in de verschillende processen (opwarming oceanen, smelten ijskappen en gletsjers etc) als tussen verschillende klimaatmodellen, een hele distributie van mogelijke zeespiegel tijdreeksen.

Met de nodige voorzichtigheid (zoals hieronder verder uitgelegd in punten) kunnen we proberen deze distributies samen te nemen om zo een enkele distributie voor de zeespiegel te verkrijgen. Dit is gedaan in dit rapport. Alvorens we deze distributie gebruiken (hierna genoemd: het fysische model), moeten de volgende voorbehouden echter worden opgemerkt:

- 1 In werkelijkheid neemt ook de globale temperatuurverandering de vorm aan van een verdeling: We weten niet precies hoe de toekomstige globale temperatuur zal veranderen. Verschillende modellen, en met name ook verschillende externe forceringen, zullen leiden tot andere resultaten. Dit betekent in stricte zin, dat de waarschijnlijkheid van ieder door het KNMI gekozen temperatuurpad (en ieder willekeurig ander) 0 is.
- 2 Ondanks dat de waarschijnlijkheid formeel 0 is, zijn de KNMI'14 scenarios bruikbaar en relevant. In de KNMI'14 scenarios zijn de globale temperaturen namelijk zo gekozen dat ze de temperatuur-verdeling zoals verkregen op basis van de IPCC modellen goed opspannen. Dan blijkt dat een sterkere globale opwarming systematisch aanleiding geeft tot meer zeespiegelstijging.
- 3 De IPCC klimaatmodellen op hun beurt zijn aangedreven door middel van 4 verschillende forceringen, uiteenlopend van een sterk mitigerend scenario (RCP2.6), tot scenario gedomineerd door sterke economische ontwikkeling (RCP8.5). Net als de temperatuur paden gekozen door KNMI, hebben de 4 forcerings scenarios intrinsiek een waarschijnlijkheid 0: We weten niet exact hoe het werkelijke verloop van de forcering zal zijn. Formeel zouden we een continue distributie van mogelijke forceringen moeten beschouwen. Dit is computationeel volstrekt onmogelijk.
- 4 Als we de distributies combineren gaan we er (stilzwijgend) vanuit dat het klimaat-systeem voor forceringen tussen de 4 RCP scenarios, zich ook in andere opzichten (bijvoorbeeld globale temperatuur, zeespiegel etc), tussen de hoekpunten zal begeven. Dit is niet getest (want computationeel onhaalbaar, zie bovengenoemd punt), maar wel waarschijnlijk en vormt de basis voor de uitspraken van IPCC.

## 2.5 Uitsplitsen

Uit bovenstaande blijkt dat er tussen de stand, trend en toekomst anders wordt omgegaan met verschillende fysische processen.

- 1 De huidige *stand*. Wind en bodemveranderingen worden meegenomen bij het bepalen van de randvoorwaarden (golven, hoogwaterstand) en de sterkte (toetsprofiel).
- 2 De huidige *trend*. Wind komt terug in de zeespiegelstand doordat de jaar gemiddelden na een stormig jaar hoger zijn, zie hoofdstuk 3. De bodemdaling van het NAP zit impliciet in de waterstandsmetingen. Bodemdaling ten opzichten van het NAP zit in de periodieke meting van het kustsysteem.
- 3 De *toekomst*. Wind veranderingen worden in de berekeningen meegenomen. In de verwachtingen met het statistische model worden bodemdalingen ten opzichte van het NAP in de schatting meegenomen. De bodemdaling wordt in KNMI'14 niet meegenomen. In het scenario voor de tweede Delta commissie werd met 10cm bodemdaling gerekend ([Delta-commissie, 2008](#)). Er is geen verwachtingscurve voor de Nederlandse bodemdaling gedefinieerd.

### 3 Effect van wind op de zeespiegelstijging

#### 3.1 Aanleiding en probleemstelling

In 2013 is door HKV en Deltares aangetoond dat het verloop van de jaargemiddelde waterstanden verklaard kan worden aan de hand van de volgende variabelen.

**Tijd** de lineaire relatie met zeespiegelstijging

**Nodaal getij** de 18,6 jarige cyclus

**Wind** de invloed van opwaaiing

Het toevoegen van de wind aan het model van [Dillingh et al. \(2010\)](#), op basis van de kwadratische windsnelheid en de windrichting (vergelijking 3.1), bleek de volgende voordelen te hebben:

- 1 Een aanzienlijk deel van de variantie in de tijdreeks met waterstanden kan worden verklaard aan de hand van de heersende windcondities.
- 2 Een eventueel aanwezige recente versnelling van de zeespiegelstijging kan door de reductie van onverklaarde variantie beter worden waargenomen.
- 3 Lange-termijnvariabiliteit in de gemiddelde windcondities kunnen effect hebben op de gemeten zeespiegelstijging langs de kust. Voor bepaalde toepassingen is het nuttig om te weten welk deel van de aan de kust gemeten zeespiegelstijging toegerekend kan worden aan een veranderend windklimaat, en welk deel verband houdt met de zeespiegelstijging zoals die karakteristiek is voor bijvoorbeeld de gehele zuidelijke Noordzee.

Een uitgebreide toelichting op deze voordelen is te vinden in [De Ronde et al. \(2013\)](#). Voor het onderzoek uit 2013 is gebruik gemaakt van data van het KNMI-station De Kooy in Noord-Holland. In Figuur 3.5 uit [De Ronde et al. \(2013\)](#) blijkt dat deze tijdreeks niet homogeen is. De sterke variatie in de gemiddelde windsnelheid is hoogst waarschijnlijk het gevolg van veranderingen in meettechnieken en oppervlakteruwheid rond het landstation, en niet van veranderingen in het windklimaat zoals dat boven zee gevonden wordt. Er ontstond daarom behoefte aan een andere databron.

$$\begin{aligned}
 h(t) = & \underbrace{\beta_0 + \beta_1 t}_{\text{lineaire regressie}} \\
 & + \underbrace{\beta_2 U^2(t) \sin(\theta(t)) + \beta_3 U^2(t) \cos(\theta(t))}_{\text{wind}} \\
 & + \underbrace{\beta_4 \sin(2\pi t/18.6) + \beta_5 \cos(2\pi t/18.6)}_{\text{nodaal getij}} \\
 & + \underbrace{\epsilon(t)}_{\text{residu}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

### 3.1.1 Met of zonder wind trend?

Als er over een jaar een gemiddeld lagere wind wordt gemeten, wordt de schatting van de zeespiegelstijging ( $\beta_1$ ) hoger.

De rest van deze sectie gaat in op de vraag: Met welke stijging willen we dan rekenen voor de suppletie volumes en andere toepassingen, de hoge zeespiegel of de lage? Dit hangt af van twee overwegingen:

- 1 Wat is de oorzaak van trend van de wind en heeft die oorzaak geresulteerd in daadwerkelijke opwaaien aan de kust?
- 2 Verwachten we dat de trend in de wind representatief is voor de toekomst?

Over het eerste punt, er is discussie over hoe trends in wind te duiden ([Vautard et al., 2010](#)). De oorzaak van trends in wind is onbepaald, is het toe te schrijven aan bebouwing of is het een klimaat effect? De trends in de zeespiegel zijn, doordat we een lange periode hebben gemeten, vrij betrouwbaar. Is het dan logisch om hier een trend bij op te tellen waar het teken van ter discussie staat? Het antwoord op die vraag hangt af van het vertrouwen in wat de oorzaak van de trend is. Voorlopig volgen we hierin [Wever \(2012\)](#) die stelt dat de afname van de wind consistent is met de ruwheidstoename.

Als ruwheidstoename de meest waarschijnlijke oorzaak is van de afnemende trend en we geen wind gedreven zeespiegelstijging verwachten is het ook niet logisch om te veronderstellen dat de "grootte van de eigenlijke zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is gemaskeerd" ([De Ronde et al., 2013](#)). Daarom bekijken we in dit hoofdstuk een alternatieve meetbron.

Over het tweede punt, indien de wind wel een verandering laat zien die veroorzaakt wordt door een proces dat ook de zeespiegel verandert, dan is de vraag die voor suppletie beleid van belang is, of deze trend door zet. Hierover stelt het KNMI dat in de berekende scenario's de veranderingen in windsnelheden klein zijn ([De Vries et al., 2014](#)), maar dat er in twee meer westen winden te zien zijn. Langs de Nederlandse kust zorgen stormen uit het noord-westen voor scheve opzet, vooral als ze langzaam passeren.

Stel dat er wel een noemenswaardige, door de wind veroorzaakte, zeespiegeltrend verwacht zou worden, dan hoeft dat niet meteen een noodzaak tot extra onderhoud aan het kustfundament te betekenen. Omdat de verhogingen tijdelijk zijn, een storm duurt enkele dagen, hoeft dit niet te betekenen dat het zand de tijd krijgt om het kustfundament te verlaten. In hoeverre het kustfundament wordt aangetast door verandering in stormigheid is niet bekend en niet actueel.

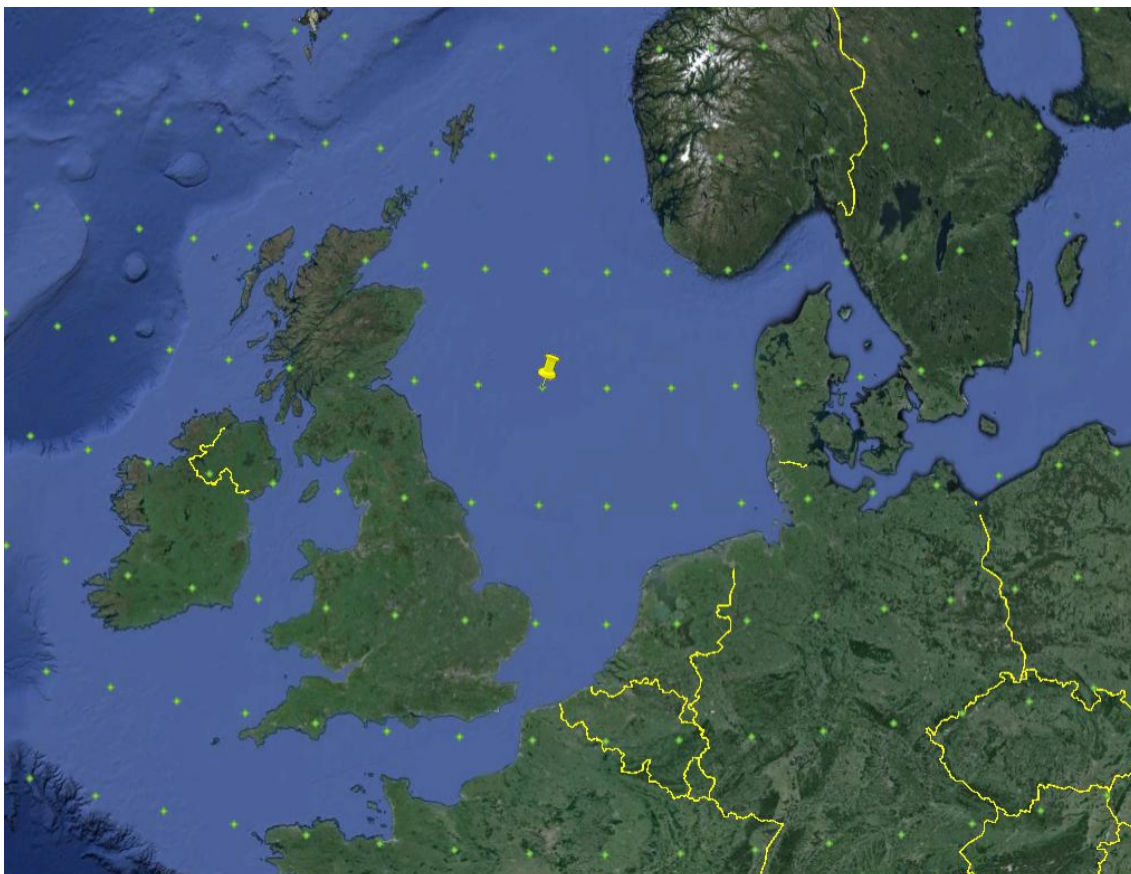
### 3.2 20th century reanalysis version 2

In de afgelopen decennia zijn meerdere meteorologische heranalyses uitgevoerd, waarbij hoofdzakelijk gebruik wordt gemaakt van gemeten luchtdrukken en berekeningen met klimaatmodellen. Een recente heranalyse is de "20th century reanalysis v2" ([Compo et al., 2011](#)). Deze heranalyse biedt gevalideerde data op 3-uurlijkse basis voor de periode 1871-2012 voor een  $2^\circ \times 2^\circ$  breedtegraad x lengtegraad rooster. Voor dit project is gebruik gemaakt van de (afgeleide) variabelen: 1 daggemiddelde windsnelheid op 10 m hoogte (noordwaartse en oostwaartse component), 2 luchtdruk op zeeniveau



Als representatieve locatie is  $(\text{lat}, \text{lon}) = (56.1893^\circ, 1.8750^\circ)$  gekozen (figuur 3.1). Er is gekozen voor dit centrale punt, zodat in de omliggende roostercellen geen invloed aanwezig is van een zogenaamd “land mask”, een routine die de invloed van het verschil tussen zee en land meeneemt. Deze routine is bij veel heranalyses een bron van onnauwkeurigheden gebleken.

Om de gevoeligheid van de locatiekeuze te onderzoeken, is ook een test uitgevoerd met een locatie dicht bij de Nederlandse kust:  $(\text{lat}, \text{lon}) = (54.2846^\circ, 3.7500^\circ)$ . Deze wijziging leverde geen noemenswaardige verschillen op in berekende zeespiegelstijging en verklaarde variantie.

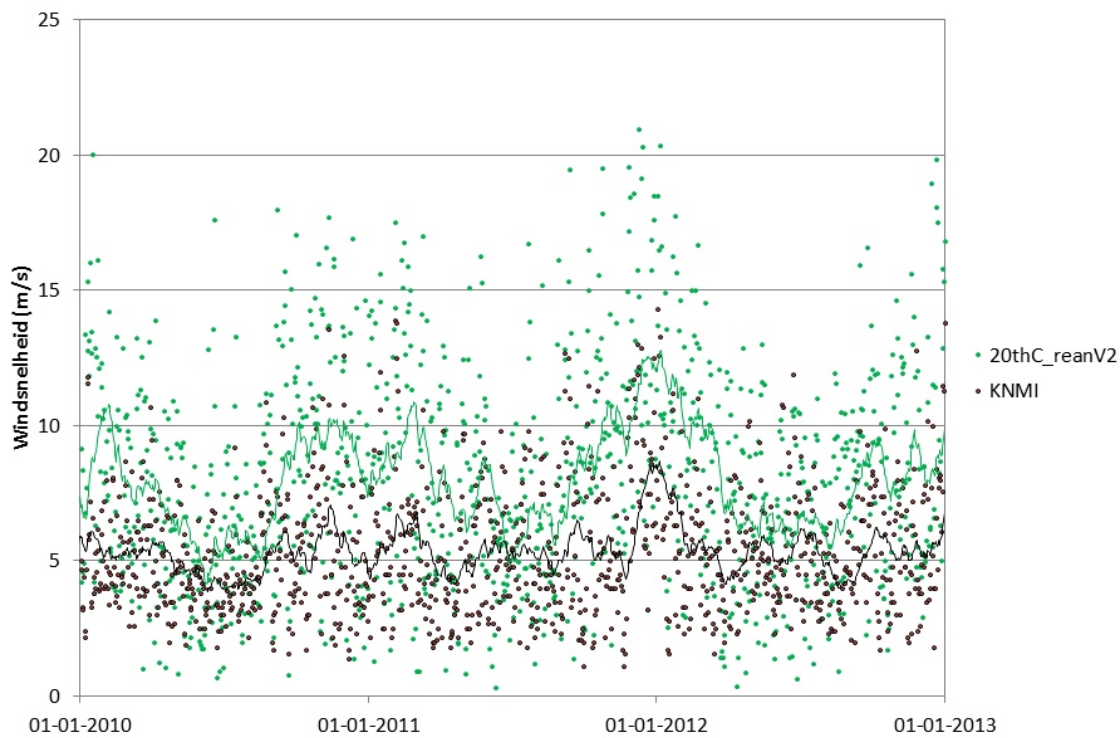


*Figuur 3.1: Geselecteerde locatie uit de 20th century reanalysis v2 database voor de tijdreeksen met windcondities en luchtdruk. Bron achtergrond kaart: Google Earth.*

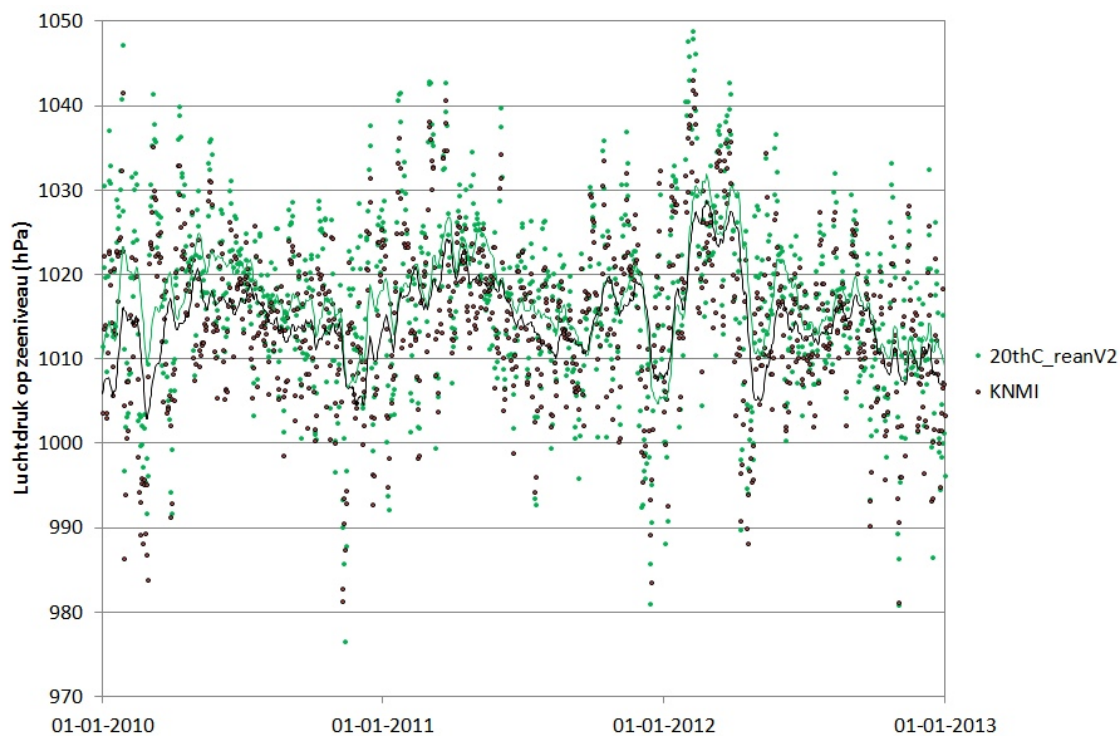
### 3.3 Vergelijking tijdseries 20th century reanalysis v2 en KNMI-station De Kooij

De figuren 3.2 en 3.3 tonen een vergelijking tussen de tijdreeksen voor windsnelheid en luchtdruk op basis van de 20th century reanalysis v2 en KNMI-station De Kooij. De luchtdruk is sterk vergelijkbaar. De windsnelheid is hoger in de heranalyse, deels vanwege het verschil in windsnelheid tussen zee en land, en deels door de genoemde kenmerken van het landmeetstation.

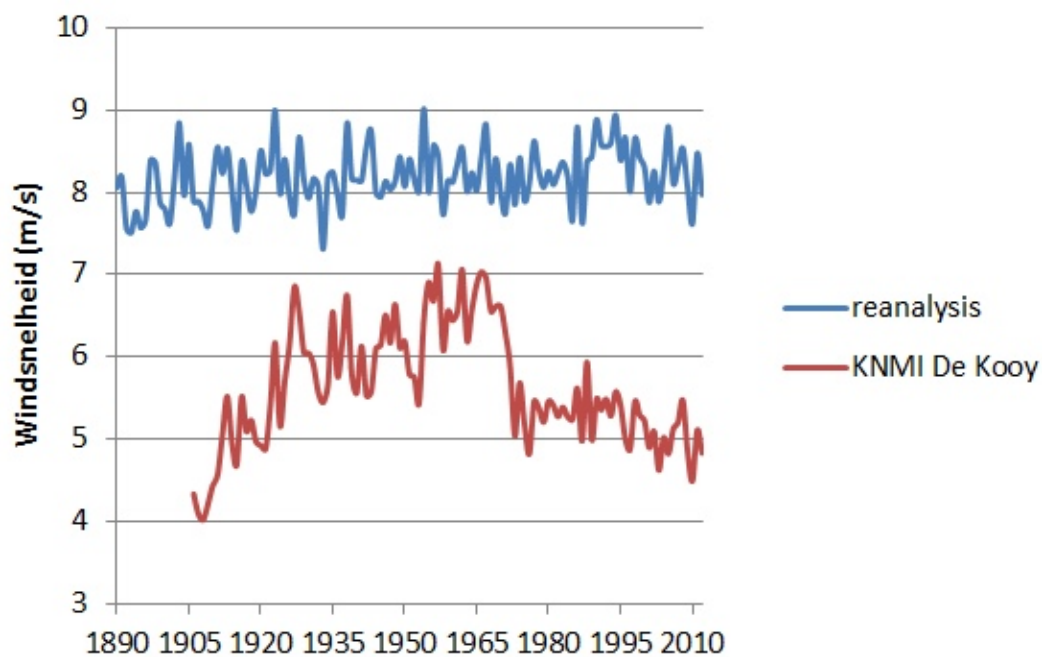
In de figuren 3.4 en 3.5 zijn de jaargemiddelde waarden voor de windsnelheid en de luchtdruk weergegeven voor beide databronnen. Het opvallendste verschil is de stabiliteit van de reeks met windsnelheden van de 20th century reanalysis v2 ten opzichte van de reeks van KNMI-station De Kooij. Luchtdrukverschillen tussen land en zee zijn gebruikelijk.



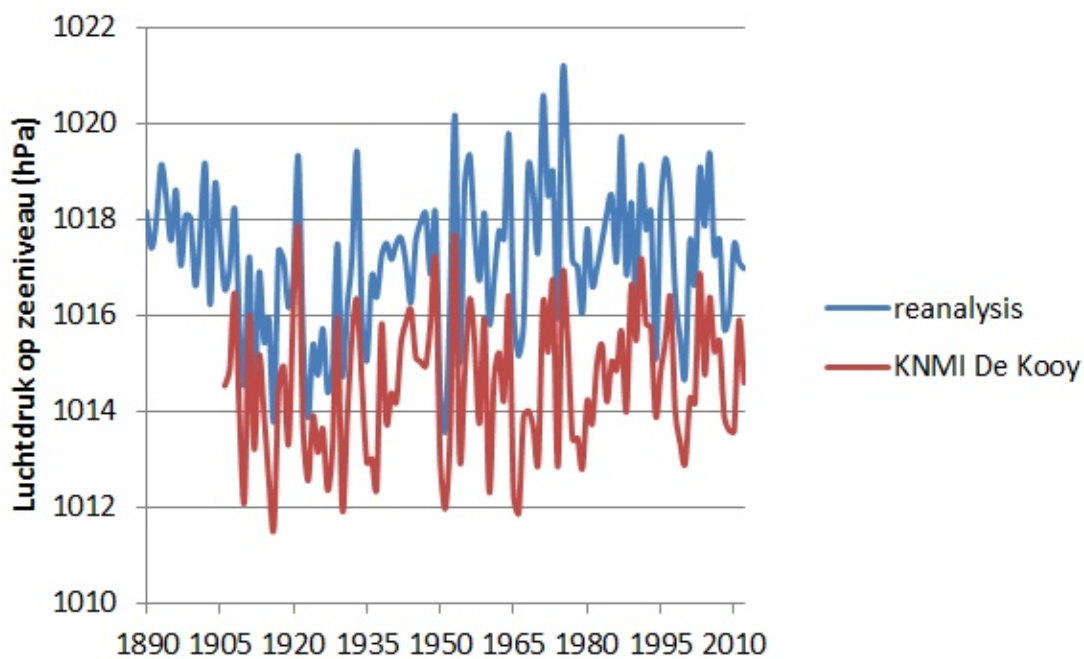
*Figuur 3.2: Vergelijking van een deel van de tijdreeks (2010-2012) met windsnelheden volgens de 20th century reanalysis v2 (groen) en KNMI-station De Kooij (zwart), inclusief een lopend gemiddelde met een venster van 30 dagen.*



*Figuur 3.3: Vergelijking van een deel van de tijdreeks (2010-2012) met luchtdrukken volgens de 20th century reanalysis v2 (groen) en KNMI-station De Kooij (zwart), inclusief een lopend gemiddelde met een venster van 30 dagen.*



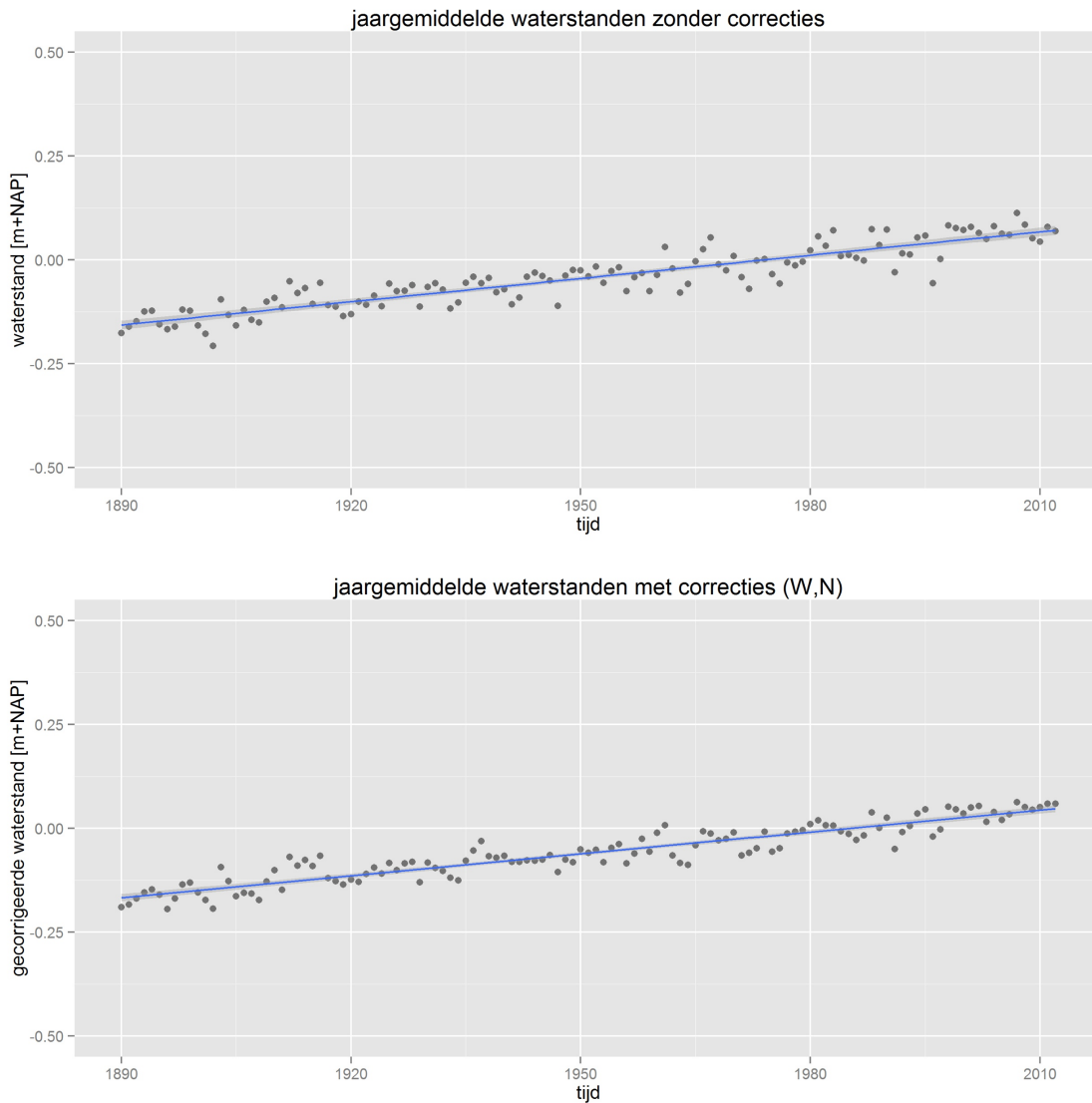
Figuur 3.4: Jaargemiddelde windsnelheid volgens de 20th century reanalysis v2 (blauw) en KNMI-station De Kooy (rood).



Figuur 3.5: Jaargemiddelde luchtdruk volgens de 20th century reanalysis v2 (blauw) en KNMI-station De Kooy (rood).

## 3.4 Resultaten

Figuur 3.6 toont de jaargemiddelde waterstanden zonder en met correcties op basis van de nieuwe tijdreeks met windsnelheid en windrichting en de 18,6-jarige getijcyclus. De variantie van het signaal reduceert opnieuw, zoals ook bleek in [De Ronde et al. \(2013\)](#).



*Figuur 3.6: Jaargemiddelde waterstanden op basis van  $\beta_0$  en  $\beta_1$  uit vergelijking 3.1 zonder (boven) en met (onder) wind correctie en 18,6 jarige getijcyclus.*

Voor de periode 1906-2012 is er data beschikbaar in beide databronnen. Resultaten voor het gemiddelde langs de Nederlandse kust zijn te vinden in tabel 3.1. De verklaarde variantie van het model volgens vergelijking 3.1 en de zeespiegelstijging ( $\beta_1$ ) zijn sterk vergelijkbaar.

Grootheid	o.b.v. KNMI De Kooij	o.b.v. 20th century reanalysis v2
Zeespiegelstijging ( $\beta_1$ ) 1906-2012	17.4 cm/eeuw	17.1 cm/eeuw
Verklaarde variantie $R^2$ 1906-2012	0.87	0.85

*Tabel 3.1: Vergelijking van gemiddelde zeespiegelstijging en verklaarde variantie voor de periode 1906-2012 voor het gemiddelde van de getijstations langs de Nederlandse kust op basis van winddata van KNMI-station De Kooij en op basis van winddata uit de 20th century reanalysis v2*





## 4 Betrouwbaarheid van het statistisch model

### 4.1 Aanleiding en doelstellingen

In [De Ronde \*et al.\* \(2013\)](#) is een lineair regressiemodel voor de zeespiegel langs de Nederlandse kust opgesteld. Dit model beschrijft de jaargemiddelde waterstand aan de hand van de volgende verklarende variabelen: 1 lineaire stijging (tijd) 2 wind 3 nodaal getij .

Toepassing van dit model op dag- en jaargemiddelde tijdreeksen van de zeespiegel bleek goede resultaten op te leveren. Het model verklaart aan de hand van de meegenomen variabelen een hoog percentage van de variabiliteit van de zeespiegel en levert een schatting en betrouwbaarheidsinterval op van de stijgsnelheid. In de genoemde studie is ook de locally weighted regression (LOESS) methode toegepast, een vorm van lokale regressie.

Dit hoofdstuk heeft de volgende doelstellingen:

- ◇ meer inzicht geven in de toepasbaarheid van de LOESS methode met verklarende variabelen
- ◇ afleiden van betrouwbaarheids intervallen voor de zeespiegelstijging

Deze intervallen worden gebruikt om tot een samengestelde schatting te komen in hoofdstuk 5.

### 4.2 Gegevens

De te verklaren variabele is de jaargemiddelde zeespiegel in m+NAP op 6 stations (Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen) alsmede het gemiddelde van de zeespiegel op deze stations. Op basis van hoofdstuk 3 worden de wind metingen van De Kooij vervangen door de reeks uit de heranalyses van National Center for Atmospheric Research (NCAR). In overeenstemming met eerder onderzoek wordt het gemiddelde van de 6 hoofdstations gebruikt en worden de meetreeksen geanalyseerd vanaf 1890. Zie voor een discussie de rapporten van [Dillingh \*et al.\* \(2010\)](#); [De Ronde \*et al.\* \(2013\)](#).

### 4.3 Statistisch model

Het gebruikte model is weergegeven in vergelijking (4.1). Deze vergelijking bestaat uit een combinatie van een lineair regressiemodel met als verklarende variabelen tijd, wind (met hoek  $\theta$  en sterkte  $U$ ) en nodaal getij (gelineariseerd) en een LOESS-model met als verklarende variabelen tijd en als verklaarde variabele het residu van het regressiemodel.

$$\begin{aligned}
 h(t) = & \underbrace{\beta_0 + \beta_1 t}_{\text{lineaire regressie}} \\
 & + \underbrace{\beta_2 U^2(t) \sin(\theta(t)) + \beta_3 U^2(t) \cos(\theta(t))}_{\text{wind}} \\
 & + \underbrace{\beta_4 \sin(2\pi t/18.6) + \beta_5 \cos(2\pi t/18.6)}_{\text{nodaal getij}} \\
 & + \underbrace{\text{loess}(\epsilon(t)) + \epsilon_i(t)}_{\text{loess op residu}}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

We passen het lineaire regressiemodel voor de zeespiegel toe, zoals is in detail beschreven in [De Ronde et al. \(2013\)](#). De onbekende coëfficiënten ( $\beta_i$ ) van het lineaire model worden geschat.

Ook al zijn er geen aanwijzingen dat er een significante versnelling is opgetreden, passen we toch een LOESS model toe op het residu. Het residu is het deel van de zeespiegel metingen dat nog niet verklaard is na het toepassen van het lineaire model inclusief nodaal getij en wind. Het vermoeden bestaat dat er nog een cyclus in dit residu kan zitten.

Het LOESS-model is een niet-parametrische “smoothing” methode. Dit deel van het model kan het niet-lineaire deel van de zeespiegeltrend beschrijven. De toepassing van LOESS vereist standaard geen aannames ten aanzien van de kansverdeling van de residuen. Alle modellen zijn geschat met behulp van het statistische programma R ([R Core Team, 2014](#)).

Een belangrijke parameter in het LOESS-model is de span. Deze smoothing parameter bepaalt welk percentage van de waarnemingen wordt meegenomen in de lokale regressie. Een span van 1 neemt alle waarden mee, een span van 0.2 neemt 20% van de waarnemingen mee. Hier kiezen we er voor om 60jaar gegevens mee te nemen, wat bij de huidige tijdreeks van 120 jaar neer komt op een span van 0.5. Dit sluit aan bij [Douglas \(1992\)](#) die adviseert ten minste 50 jaar mee te nemen. Niet alle jaren worden even zwaar meegewogen. De laatste 20 jaar wegen voor ongeveer de helft mee, hetgeen aansluit bij het advies van [Baart et al. \(2012\)](#) dat, na inclusie van nodaal getij, 20 jaar voldoende is om een acceleratie te detecteren.

We kiezen een LOESS met een eerste graad zodat het model de vrijheid heeft om lokaal lijnen te fitten. Dit veronderstelt dat een eventuele recente hogere stijging representatief is voor de toekomst. In de literatuur worden zowel polynomen ([Jevrejeva et al., 2014](#)) als gebroken lijnen gebruikt ([Gerritsen and Van den Boogaard, 2007](#)). Deze methode is equivalent aan de methode van [Gerritsen and Van den Boogaard \(2007\)](#) maar voortschrijdend toegepast met meer gewicht aan recente waarnemingen.



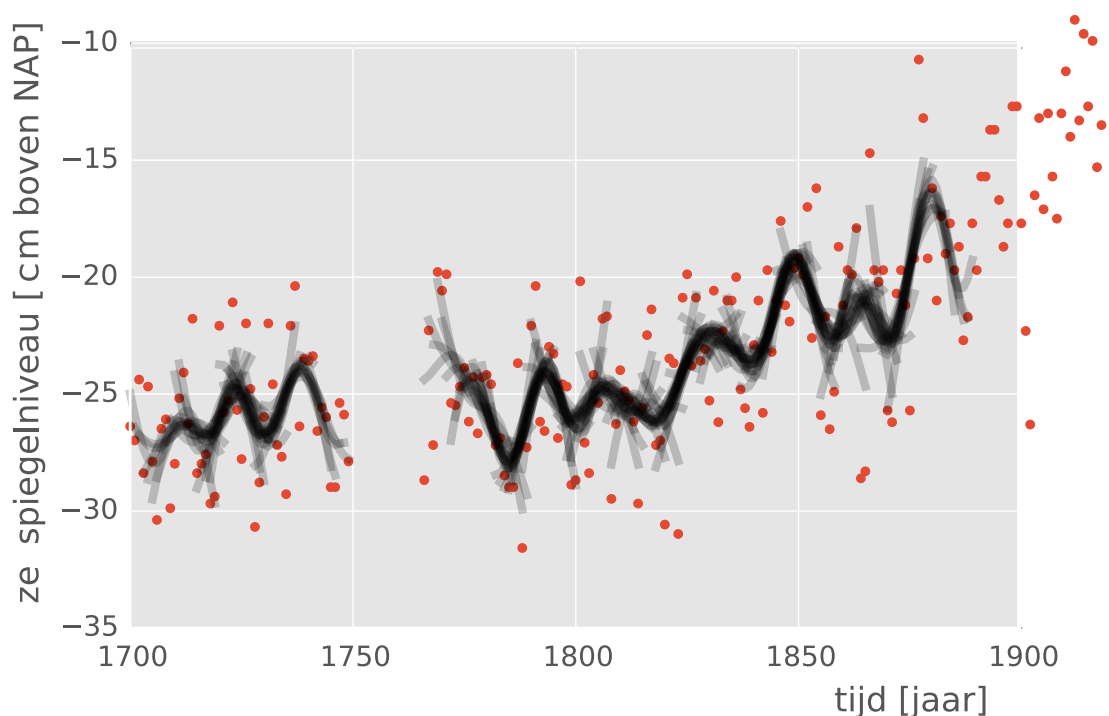
#### 4.4 Voorspelling

We kunnen het statistische model gebruiken om de huidige trend en de huidige stand te bepalen. Daarnaast kan het gebruikt worden voor voorspellingen.

Als een statistisch model wordt gebruikt voor voorspellingen, dan neemt men aan dat de toekomst uit dezelfde populatie komt als het verleden. We hebben al vrij lang een nagenoeg constante zeespiegel trend gezien. Dit komt terug in het nauwe betrouwbaarheidsinterval van 3cm in 2100. De lineaire LOESS geeft een betrouwbaarheidsinterval van 8cm voor 2100. Deze gecombineerde nauwe band van 11cm komt niet overeen met de betrouwbaarheid die redelijkerwijs aan het statistische model kan worden toegedicht.

Dat we weten dat dit niet redelijk is komt omdat we de waterstanden al gedurende langere periode meten. De trends over de laatste 314 jaar metingen hebben meer gevarieerd dan we in de laatste eeuw hebben gezien. We veronderstellen dat de variaties die we voor 1890 hebben gezien ook in de toekomst kunnen optreden.

Om hier rekening mee te houden berekenen we lineaire trends (vergelijking 3.1 zonder de wind termen ( $\beta_2$ ,  $\beta_3$ , die is niet beschikbaar in de heranalyse) over de periode 1700-1890 voor het station Amsterdam fig. 4.1. Hiermee hebben we een lange meetreeks waar een redelijk sterke klimaatverandering heeft opgetreden (het einde van de kleine ijstijd). We zouden nog verder terug kunnen gaan en ook de paleontologische metingen kunnen toevoegen, maar daar is nu niet voor gekozen, omdat uit deze metingen geen korte termijn (20jaar) trend veranderingen zijn af te leiden. In de slingeringen is het nodale getij terug te zien. Alleen de lineaire term ( $\beta_1$ ) wordt voor de variantie gebruikt.



*Figuur 4.1: Lineaire regressie (vergelijking 3.1 zonder de wind termen ( $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ) toegepast op de jaargemiddelde zee waterstanden van Amsterdam over de periode 1700-1890.*

Doordat we de variantie van de periode 1700-1890 toevoegen wordt het statistische model over

tijd steeds minder betrouwbaar. Dit komt overeen met het vertrouwen dat we hebben in het statistisch model (redelijk goed voor korte termijn voorspellingen, niet goed voor lange termijn voorspellingen) en resulteert dus in een betere face validiteit.

Hoe het komt dat we zo lang een lineaire stijging gezien hebben is niet te zeggen op basis van de statistische gegevens. Er wordt geprobeerd om de trend zoals we die globaal gezien hebben te heranalyseren (bijvoorbeeld [Gregory et al., 2012](#)), maar dit resulteert in de conclusie dat de zeespiegel trend eigenlijk nog lager is geweest dan we tot nu toe veronderstelden ([Hay et al., 2015](#)).

#### 4.5 Betrouwbaarheids- en predictie-intervallen zeespiegel

Het betrouwbaarheidsinterval heeft betrekking op een (functie van een) onbekende parameter, zoals de coëfficiënten in het lineaire model of het LOESS-model. Niet te verwarren met het bredere predictie interval waar ook de variantie van observaties zijn meegenomen. De predictie intervallen laten gebruiken we niet in dit rapport.

Uit onderzoek ([Cleveland et al., 1992](#)) volgt dat de gestandaardiseerde residuen van het LOESS-model  $t$ -verdeeld zijn met  $\rho$  vrijheidsgraden. Hierbij is  $\rho$  een functie van een smoothing matrix die een lineair verband tussen de gefitte en geobserveerde waarden van de afhankelijke variabele in het LOESS model legt.

Op basis van de lineaire trends uit Amsterdam wordt een extra onbetrouwbaarheidsterm toegevoegd. De helling (berekend over 20 jaar) varieert met een standaard deviatie van 17cm/eeuw. Deze variatie wordt als extra term in het betrouwbaarheidsinterval toegevoegd vanaf het huidig jaar. Deze term wordt naar verwezen als de Amsterdam term.

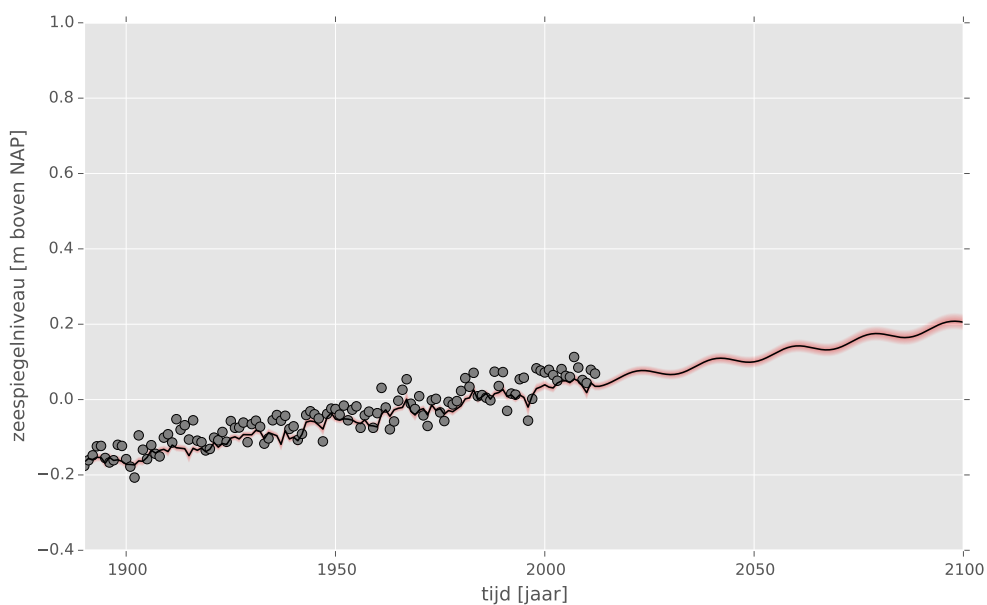
#### 4.6 Toepassing

De methode wordt toegepast in een tweestaps procedure. Eerst wordt het lineaire deel van het model gefit. Op de residuen ( $\epsilon_t$ ) wordt het LOESS model gefit.

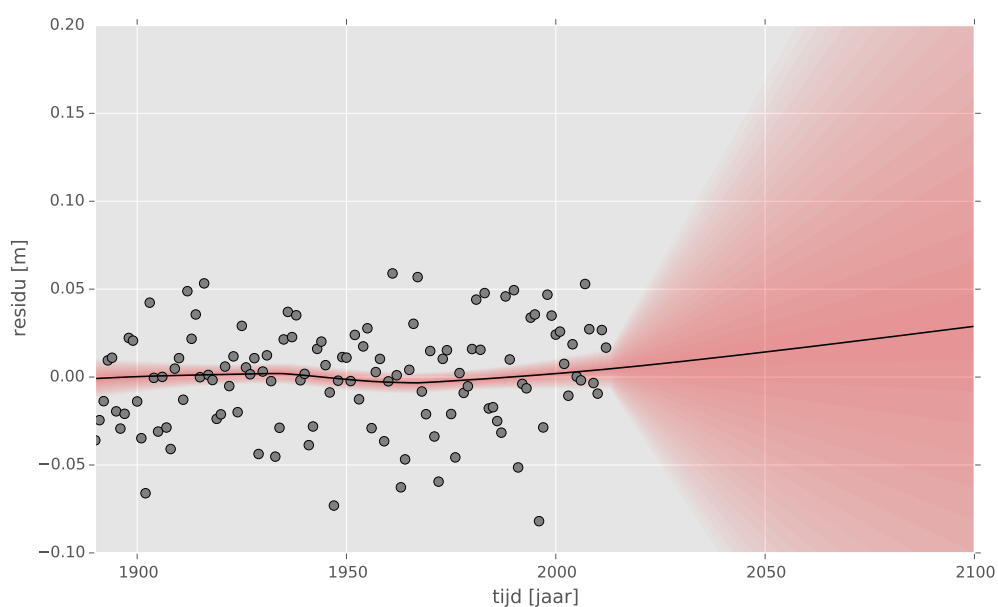
De resultaten van de schatting van de lineaire termen van het regressiemodel zijn weergegeven in fig. 4.2. De toekomstige voorspelling is gebaseerd op de gemiddelde windsnelheid en richting. Opvallend is het zeer nauwe betrouwbaarheidsinterval (95%). Deze is zo nauw omdat we met wind, nodaal getij en een lineaire trend de zeespiegel over de laatste 120 jaar nagenoeg perfect kunnen beschreven. De helling is over de hele periode ongeveer 17 a 18cm per eeuw en dat is dan ook de verwachting voor de volgende eeuw.

Figuur 4.3 laat zien dat er nog een subtiele trend in de zeespiegel te zien is. De 0 lijn ligt over de hele periode in het interval wat er op neer komt dat we deze versnellingen niet significant kunnen noemen.

De combinatie van deze twee intervallen waarvan de varianties opgeteld kunnen worden, resulteert in het betrouwbaarheidsinterval van het volledige model. Deze intervallen vormen de basis van de samenvoeging van de modellen en zijn weergegeven in fig. 4.4. Het interval laat zien dat we over de afgelopen eeuw vrij zeker kunnen stellen dat de zeespiegel constant is gestegen, maar dat het in de toekomst kan vriezen of dooien. Omdat er in de literatuur geen consensus lijkt te bestaan over een concreet knippunt, is deze aanpak gekozen boven de meer parsimonische



Figuur 4.2: Lineaire regressie op de jaargemiddelde zeewaterstanden van het gemiddelde over de hoofdstations inclusief betrouwbaarheidsinterval, voordat de LOESS is toegepast.

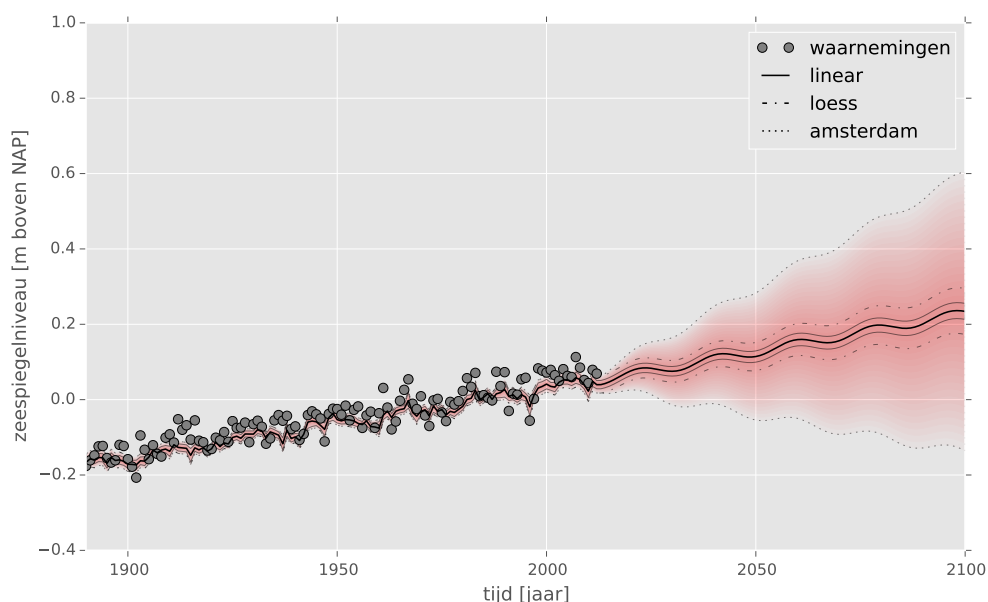


Figuur 4.3: LOESS-model toegepast op de residuen van het lineaire model, inclusief de Amsterdam term.

term	coef	std fout
constant	-44.66 mm	6.51
lineair	1.76 mm/jaar	0.07
nodal cos	3.80 mm	3.23
nodal sin	-11.86 mm	3.14
wind cos	1.26	0.19
wind sin	-0.47	0.27
loess 2013	0.28 mm/jaar	0.23

Tabel 4.1: Parameters in het lineaire zeespiegel model voor het gemiddelde van de zes hoofdstations.

lineaire benadering van knikpunten (Gerritsen and Van den Boogaard, 2007).



Figuur 4.4: Model (4.1) toegepast op de jaargemiddelde zeewaterstanden voor de gemiddelde over de 6 hoofdstations.

## 4.7 Stijgsnelheid zeespiegel

In tabel 4.2 staat de stijgsnelheid [cm/eeuw] van de zeespiegel voor 6 stations langs de kust en de gemiddelde zeespiegel op deze 6 stations. De snelheid is gebaseerd op de coëfficiënt van de variabele 'tijd' in de meervoudige lineaire regressie op de jaargemiddelde zeespiegel ( $\beta_1$  uit vergelijking 4.1). De tabel bevat ook de grenzen van het 95%-betrouwbaarheidsinterval rondom de snelheid.

Station	gemiddelde	2.5%	97.5%
Delfzijl	17,4	15,8	19,0
Harlingen	11,0	9,4	12,7
Den Helder	13,7	12,2	15,1
IJmuiden	20,1	18,4	21,9
Hoek van Holland	22,8	21,2	24,4
Vlissingen	20,8	19,3	22,3
Gemiddeld	17,6	16,2	18,9

Tabel 4.2: Zeespiegelstijging in cm / eeuw op basis van het meervoudig lineaire regressie-model toegepast op jaargemiddelde zeespiegel in de periode 1890-2013.

#### 4.8 Aanbevelingen

We adviseren om bovenstaand model als standaard rekenmethode te gebruiken voor suppletie beleid. Dat wil zeggen een lineair regressie model volgens vergelijking 4.1, met als databronnen

- 1 de zeespiegelstanden zoals aangeleverd aan de PSMSL, teruggerekend naar NAP post 2005, gemiddeld over de 6 hoofdstations (Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen)
- 2 met de inverse barometer correctie toegepast op basis van luchtdrukken uit de National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/NCAR heranalyses, met als referentie punt het referentie punt (56.1893°, 1.8750°)
- 3 met meegenomen de over het jaar gemiddelde gekwadraterde windsnelheid uitgesplitst in cartesische componenten U en V op basis van de NCEP/NCAR heranalyses, met als referentie punt (56.1893°, 1.8750°)
- 4 met meegenomen het nodale getij, met vrije fase en amplitude op basis van de vaste periode 18.613 jaar
- 5 met op de residuen toegepast een lineaire LOESS met een span overeenkomend met 60 jaar gedeeld door de lengte van tijdreeks in jaren.
- 6 voor de schatting van het betrouwbaarheidsinterval in de toekomst kan de betrouwbaarheid van de lineaire trend uit het verleden, op basis van het station in Amsterdam worden meegenomen.

Dit beantwoordt vraag 1 .



## 5 Combinatie van modellen

Om de zeespiegel in de toekomst te beschrijven worden twee modellen gebruikt. Een fysisch model ([De Vries et al., 2014](#)) gebaseerd op het doorrekenen van klimaat modellen en het statistische model zoals beschreven in hoofdstuk 4. Beide modellen worden vanuit verschillende benaderingen ontwikkeld en beide proberen een betrouwbare en valide schatting van de toekomstige zeespiegel te maken.

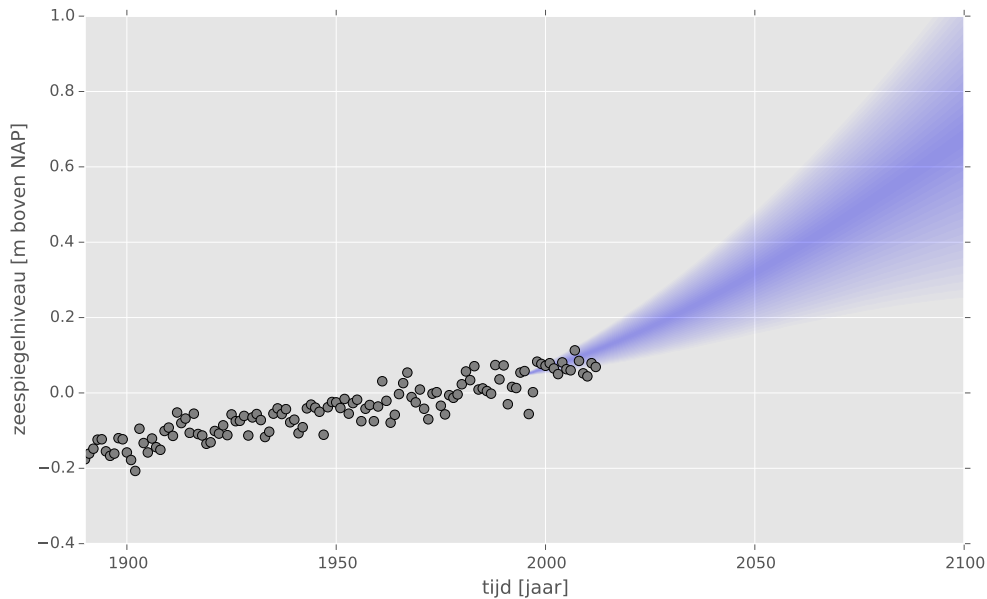
We verwachten dat de statistische methode vooral voor de eerste decennia goed werkt, omdat over de laatste eeuw simpele statistische modellen een grote voorspelkracht hebben gehad. Later in de 21e eeuw, wanneer temperatuursveranderingen waarschijnlijk een grote invloed zullen hebben, hebben we meer vertrouwen in het fysische model.

In dit hoofdstuk beschrijven we een methode om deze twee methoden te combineren. De noodzaak om tot een samenvoeging van deze twee aanpakken te komen is al eerder geformuleerd in [Dillingh et al. \(2010\)](#). Zoals in hoofdstuk 2 is beschreven is het voor ontwerpdoeleinden van belang om een schatting van de zeespiegelstijging over verschillende periodes te kunnen maken, om ook op tussentijdse momenten gefundeerde uitspraken te kunnen doen over de mate van zeespiegelstijging.

Behalve de wens voor continuïteit is het maken van een betrouwbaardere en accuratere voorspellingen ook een streven. Een van de methoden om de bandbreedte te beperken is het gebruiken van meerdere modellen. Volgens de diversiteits-voorspel theorie ([Page, 2010](#)) kunnen we de fout die we maken met meerdere modellen schrijven als functie van de gemiddelde fout per model en de diversiteit tussen modellen. Als we meerdere onafhankelijke modellen combineren kunnen we tot een betere schatting komen. Deze schatting wordt beter naarmate de modellen meer van elkaar verschillen. In algemene zin kunnen we dus ook stellen dat het combineren van meerdere modellen tot een meer accurate voorspelling leidt. In populair wetenschappelijke kringen wordt dit ook wel de “wisdom of the crowds” genoemd, maar van een crowd is met twee modellen nog niet echt sprake.

Om modellen samen te voegen wordt gebruik gemaakt van kansverdelingen. Voor beide modellen zijn kansverdelingen beschikbaar. In hoofdstuk 4 is de methode voor de betrouwbaarheid van het statistische model gegeven. De methode van de berekening van het fysische model is beschreven in [De Vries et al. \(2014\)](#) fig. 5.1.

Dit hoofdstuk beschrijft eerst verschillende methoden om meerdere modellen te combineren. Vervolgens wordt deze methode toegepast op het fysische en statistische model.



Figuur 5.1: Betrouwbaarheidsintervallen van het fysisch model.

## 5.1 Methoden om theorie en waarnemingen te combineren

Het probleem van de koppeling van scenario's en waarnemingen kan worden teruggebracht tot het combineren van twee informatiebronnen die beide hetzelfde proces beschrijven, in termen van (een parametrische beschrijving van) kansdichtheden, tot één (parametrische) kansdichtheid. Hiertoe bestaat een grote verscheidenheid aan methoden, waarvan we er hier een paar noemen. Ze zijn in twee categorieën onder te brengen:

**Optellen van verdelingen** Dit is analoog met een gemengde verdeling van een populatie die zowel uit de ene als uit de andere verdeling gesampled is. De resulterende verdeling is breder dan elk van de onderliggende verdelingen.

**Middelen van verdelingen** gewogen met hun sample grootte. Dit komt neer op het poolen van waarnemingen.

**Bayesian Model Averaging (BMA)** Gewogen middeling van verschillende verdelingen, waarbij waarnemingen de gewichten beïnvloeden. Dit wordt toegepast in forecasting met meerdere modellen waartussen een afweging gemaakt moet worden. Het gewicht dat dan aan elk model gekoppeld wordt, is proportioneel gekozen met de waarschijnlijkheid van de data trainingsset, geconditioneerd op het desbetreffende model.

**Mixture density networks (MDN)** Deze aanpak lijkt op BMA, maar de optimalisatie van de gewichten is anders. De data trainingsset wordt hier gebruikt voor een neurale netwerk, dat getraind wordt om gewichten te bepalen voor de verschillende modellen in een forecast situatie. Dit is ver verwijderd van het doel van dit onderzoek en daarom is deze optie niet verder onderzocht.

**Overlappen van verdelingen** Deze aanpak, die ook wel als 'conflation' wordt aangeduid in de literatuur, is analoog met het opwaarderen van de ene verdeling met de informatie van de andere verdeling. De resulterende verdeling is smaller dan elk van de onderliggende verdelingen.



**Bayesian inference** Het aanpassen van een kansverdeling met aanvullende informatie.

**Data assimilatie** Verschillende vormen van data assimilatie worden op diverse terreinen ingezet, van het bijsturen van projectielen tot weermodellen, met één gemeenschappelijke gedachte, n.l. dat modellen moeten 'leren' van waarnemingen en daardoor zekerder worden.

Het optellen van verdelingen zou van toepassing op twee (of meerdere) modellen die we deels vertrouwen. Een voorbeeld hiervan zijn de KNMI scenario's. De verschillende scenario's samen worden verondersteld de mogelijke toekomstscenario's te beschrijven. Als scenario's uiteen lopen, is dat terug te zien in de totale onzekerheid van de combinatie.

Het overlappen van verdelingen is hier de voor de hand liggende keuze omdat we twee beschrijvingen van *dezelfde* zeespiegel hebben die het volledige vertrouwen hebben, en waarvan we de doorsnede zoeken. De methode Bayesiaanse inferentie is hier het meest van toepassing. Data assimilatie is hier een uitgebreide methode van die toegepast wordt als een model tijdens het rekenen wordt aangepast met nieuwe gegevens. Die uitbreiding is voor onze toepassing niet relevant omdat beide modellen apart worden uitgerekend.

De volgende sectie beschrijft de achtergrond van het overlappen van verdelingen en inferentie methode.

## 5.2 Conflatie

Om de Bayesiaanse methode toe te passen hebben we de twee verdelingen nodig: 1 de verdeling  $N$  van het statistische model ( $N_{stat}(\mu_{stat}, \sigma_{stat})$ ) met een gemiddelde  $\mu$  en standaard deviatie  $\sigma$  2 de verdeling van het fysische model ( $N_{fysisch}(\mu_{fysisch}, \sigma_{fysisch})$ ). Door het toepassen van de Bayes regel kunnen we de schatting maken van de posteriori verdeling zie bijvoorbeeld (Box and Tiao, 2011). Deze verdeling geeft de meest waarschijnlijke schatting van de zeespiegel, onder de aanname dat we beide modellen evenveel vertrouwen. De verdeling heeft een gemiddelde  $\mu_{posterior}$  (5.1) en een variantie  $\sigma_{posterior}^2$  (5.2).

$$\mu_{posterior} = \frac{\frac{1}{\sigma_{stat}^2} \mu_{stat} + \frac{1}{\sigma_{fysisch}^2} \mu_{fysisch}}{\frac{1}{\sigma_{stat}^2} + \frac{1}{\sigma_{fysisch}^2}} \quad (5.1)$$

$$\frac{1}{\sigma_{posterior}^2} = \frac{1}{\sigma_{stat}^2} + \frac{1}{\sigma_{fysisch}^2} \quad (5.2)$$

Deze methode kunnen we elk jaar afzonderlijk toepassen.

De Bayes-methode heeft een paar belangrijke voordelen ten opzichte van alternatieve methoden. Er is geen subjectieve weging vereist van de bijdragen; de gewichten volgen automatisch uit hun onzekerheden. De resultante voorspelling is een compromis tussen beide bijdragen, omgekeerd gewogen met hun respectievelijke variantie, de meest zekere is dus dominant. Vooral deze laatste eigenschap komt goed van pas als we informatie uit waarnemingen naadloos willen

laten overgaan in een hypothese of scenario voor de toekomst. Extrapolatie vanuit waarnemingen in de toekomst wordt onzekerder naarmate men verder voorbij de laatste waarneming kijkt. De relatieve invloed van de waarnemingen neemt daardoor automatisch af het resultante betrouwbaarheids interval gaat met de tijd steeds meer op dat van het scenario lijken, terwijl in het interval van de waarnemingen het scenario een beperkte (corrigerende) rol speelt. De resultante variantie is kleiner dan die van de zekerste bijdrage. Dit correspondeert met het idee dat het toevoegen van informatie een betere, minder onzekere schatting oplevert. Tenslotte is de aanpak hierboven symmetrisch, beide modellen worden op dezelfde wijze behandeld.

### 5.3 Toepassing

Het resultaat van de toepassing van de methode op het fysische en statistische model resulteert in een curve, de posterior. We kunnen deze uitleggen als de statistische trend gegeven dat het fysische model veronderstelt dat de zeespiegel sneller gaat stijgen. Of omgekeerd, de trend van het fysische model, gegeven dat de zeespiegel nog niet zo snel aan het stijgen is.

De veronderstelde kansverdelingen van beide modellen sturen elkaar bij tot een gemeenschappelijke curve figuur 5.2. Hoeveel de twee modellen worden meegewogen hangt af van de grootte van de grootte van het betrouwbaarheidsinterval. In het begin van de periode (1995-2000) is de curve van het fysische model erg smal. Dit is per definitie zo. De fysische curve is gebaseerd op ensembles en alle ensembles zijn met dezelfde waterstand begonnen.

Het weer is een dynamisch systeem, door de invoer wat te variëren ontwikkelt het systeem zich in verschillende richtingen. De spreiding hiervan wordt doorgerekend en resulteert in een spreiding van de zeespiegel. Hier gaan we er van uit dat deze spreiding ook representatief is voor de mogelijke zeespiegeltrends in de toekomst.

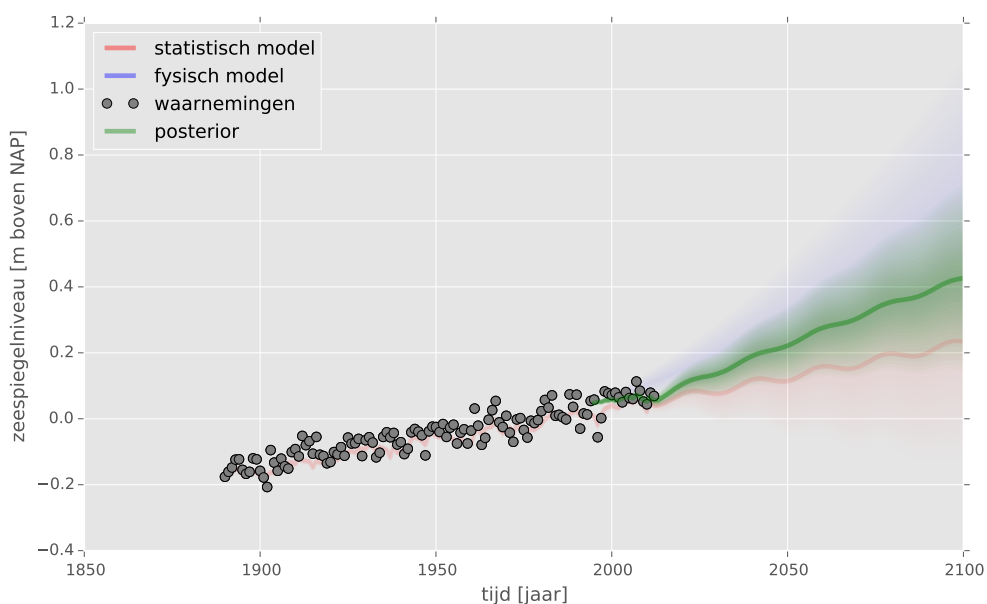
Het interval van de curve van het fysische model neemt snel toe. Hierdoor is het statistische model in de periode waar metingen zijn waarschijnlijker en volgt de posterior curve vooral het statistische model. Vanaf ongeveer 2025 heeft het fysische model een kleiner interval dan het statistische model en volgt de posterior curve steeds meer het fysische model.

De intervallen van het statistische model lopen vrij wijd uit. Dit komt omdat de kennis over variantie uit het verleden op basis van het station uit Amsterdam is toegevoegd. Het argument hierbij is dat de periode tussen 1700 en 1890 meer variatie in zeespiegelstijging liet zien. Ook in andere gebieden in de wereld stijgt de zeespiegel niet zo constant, of met andere stijgsnelheden als we langs de Nederlandse kust de afgelopen eeuw hebben gezien.

We gaan er vanuit dat de relatieve zeespiegel kan versnellen of vertragen. Zouden we deze extra Amsterdam term niet hebben toegevoegd, dan gaan we er van uit dat de zeespiegel observaties van de laatste eeuw representatief zijn voor de zeespiegel metingen die we de volgende eeuw zullen doen. Dit zou resulteren in een nauwe band van het statistische model en dan zou de posterior curve met een nauwe band de ondergrens van het fysisch model volgen.

Voor het samenvoegen van de stand zou het logisch zijn om het fysische model te laten beginnen in het verleden, dat gebeurt al, op dezelfde hoogte als het statistische model. Dat laatste gebeurt nu niet omdat het nodale getij en de wind niet in de start van het fysische model zijn meegenomen. Het begint daarom hoger dan het statistische model.

De verschillende doelen, "recente metingen meer waarde toekennen", "een methode vinden



Figuur 5.2: Samenvoeging (groen) van het fysische model (blauw) (De Vries et al., 2014) met het statistische model (rood) hoofdstuk 4

die metingen en model resultaten laat aansluiten” en een “betrouwbare schatting”, zijn niet goed verenigbaar. De lineaire methode is de meest betrouwbare, maar kent recente metingen niet meer waarde toe. Een lineaire LOESS aanpak is minder betrouwbaar maar kent recente metingen meer waarde toe, maar sluit niet aan bij de resultaten van het fysisch model. De extra Amsterdam term is onbetrouwbaar en wat arbitrair, maar sluit wel aan bij de resultaten van het fysisch model. Uiteindelijk is uit overwegingen van face-validiteit, “wat oogt goed”, gekozen voor de methode van een lineaire methode inclusief lineaire LOESS en de Amsterdam term.

#### 5.4 Conclusie

Voor de toekomstige zeespiegel kan het beste een methode gebruikt worden die voor de nabije toekomst, eerste 30 jaar, vooral gebaseerd is op het statistische model. Voor de verdere toekomst kan beter overgestapt worden op het fysische model. Voor de verdere toekomst heeft KNMI 2 verschillende scenario's gemaakt, omdat de spreiding in globale temperatuur van grote invloed is. Dit beantwoordt vraag 2 .

Om de modellen te laten aansluiten is de onzekerheid over het al dan optreden van een versnelling meegenomen in het statistische model. Hierdoor zijn het fysische model en het statistische model te combineren door een gewogen samensmeltingen van de verdelingen op elk tijdstip. Dit beantwoordt vraag 3 .



## 6 Frequentie zeespiegel kengetallen

Voor het kustbeleid zijn de waarden van de zeespiegelstijging, en de bijstelling daarvan aan de laatste inzichten, van groot belang. Dit betreft ten eerste de waarde van de huidige zeespiegelstijging, die vooral van belang is voor kustlijn­zorg en de jaarlijks te suppleren hoeveelheid zand (de te suppleren hoeveelheid zand is het oppervlakte, van het kustfundament plus Wadden en Westerschelde, maal de huidige zeespiegelstijging). Een hogere zeespiegelstijging leidt zo tot een groter suppletievolume.

Bij de vaststelling van de Basis KustLijn (BKL) in 1990 is uitgegaan van de waterstanden en zeespiegel van 1990. Na 1990 is op verscheidene plekken en op enkele tijdstippen de BKL aangepast. Een verandering in de gemiddelde zeespiegel is hierbij tot nu toe, vanwege de geringe verandering in de gemiddelde zeespiegelstand, niet meegenomen. Inmiddels is de zeespiegel om en nabij de 5cm gestegen. Dit lijkt niet veel, maar gegeven de vlakke hellingen van de kust en de regionale verschillen in zeespiegel stijging, is het raadzaam om na 25 jaar het controle volume van de BKL weer te herzien.

Het is evident dat de te hanteren waarde voor de huidige zeespiegel en de waarde van de huidige zeespiegelstijging robuust dienen te zijn en dat deze waarden niet steeds mogen fluctueren. Bijstelling van deze waarden aan de nieuwste inzichten vergt dan ook een nauwgezette afweging en bijbehorende nauwgezette bepalingsmethodiek.

Naast de waarde van de huidige zeespiegel en huidige zeespiegelstijging zijn ook de waarden van de toekomstige zeespiegel en zeespiegelstijging nodig ten behoeve van het toetsen en ontwerpen van primaire waterkeringen (veiligheidsbeleid). Dit betreft de waarden 12 jaar vooruit ten behoeve van de toetsing van de primaire waterkeringen en de waarden verder vooruit in de tijd (20 tot 50 jaar) ten behoeve van het ontwerp van nieuwe of te versterken waterkeringen en kunstwerken.

De volledige kromme van zeespiegelstijging in het verleden en in de toekomst zoals afgeleid in hoofdstuk 5 geeft alle benodigde waarden. Hier willen we de vraag beantwoorden met welke frequentie deze lijn en daarmee de gevraagde waarden bijgesteld en vastgesteld dienen te worden. De beantwoording is opgebouwd vanuit twee kanten: enerzijds de beschikbaarheid van de input gegevens in de tijd en anderzijds de noodzaak en gebruik van de uitkomsten in de tijd.

## 6.1 Invoer gegevens

De gemeten waterstanden leveren geen beperking op, deze worden continue gemeten, nieuwe jaargemiddelde waarden komen jaarlijks beschikbaar. De toekomst scenario's van het KNMI zijn de laatste paar keer gekoppeld aan de ongeveer 6 jaarlijkse cyclus waarmee de IPCC rapportages uit bracht (1990, 1995, 2001, 2007, 2014). Onder de aanname dat deze cyclus zich voortzet, zullen nieuwe scenario's voor de zeespiegelstijging eveneens om de 6 jaar kunnen verschijnen. De in hoofdstuk 5 ontwikkelde techniek is jaarlijks toe te passen op het moment dat er nieuwe jaargemiddelde zeespiegelstanden beschikbaar komen. Om de 6 jaar is er dan een grotere aanpassing omdat er nieuwe scenario's beschikbaar zijn. Ten aanzien van het gebruik van nieuwe bijgestelde waarden voor zeespiegel en zeespiegelstijging is er bij de toetsing sprake van een cyclus van 12 jaar. Op dit moment is deze cyclus nog 6 jaar, maar deze wordt waarschijnlijk veranderd in 12 jaar. Het ontwerpen ten behoeve van nieuwbouw en versterking van keringen is niet aan een cyclus gebonden. Eventuele verandering in de suppletiehoeveelheden is gekoppeld aan de 6 jaarlijkse cyclus van het Nationaal Water Plan (NWP).

## 6.2 Overwegingen

Gezien de hierboven beschreven cycli is het aan te bevelen om een cyclus voor de bepaling van zeespiegelstijging te hanteren.

Een cyclus van 6 of 12 jaar sluit aan bij de cyclus van het NWP. Een cyclus van 6 of 12 jaar sluit aan bij de veiligheidstoetsing. Een cyclus van ongeveer 6 jaar sluit aan bij de IPCC en het KNMI.

De verschillende cycli laten de mogelijkheid open voor een cyclus van 6 of 12 jaar. Een cyclus van 12 jaar wordt niet aanbevolen omdat er na het uitkomen van nieuwe scenario's van zeespiegelstijging, indien deze sterk afwijken, er vragen zullen rijzen welke nieuwe waarden Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) gaat hanteren voor het kustbeleid en voor het veiligheidsbeleid.

Een cyclus van 6 jaar ligt voor de hand omdat dit aansluit bij de cycli van het NWP en bij het KNMI.

Bij een cyclus van 1 jaar kan de trend tijdens een ontwerpfase veranderen en dat is onwenselijk. Daarnaast zullen, omdat de scenario's niet veranderen, de veranderingen van de kengetallen beperkt zijn. Voor de continuïteit van de kennis en om de vinger aan de pols te houden wordt aanbevolen om wel ieder jaar een nieuwe kromme te bepalen van zeespiegelstijging en de waarde te bepalen van de huidige zeespiegelstijging als er nieuwe meetwaarden beschikbaar zijn.

## 6.3 Aanbeveling

Hanteer een cyclus van 6 jaar voor het evalueren van de in hoofdstuk 5 ontwikkelde methode en voor de eventuele bijstelling van de waarden van zeespiegelstijging ( huidig, verleden en toekomst). Pas de in hoofdstuk 5 ontwikkelde methode wel ieder jaar toe na het beschikbaar komen van de nieuwste meetwaarden om een vinger aan de pols te houden. Hierbij kan eventueel aangesloten op andere kengetallen van de kust die jaarlijks worden gerapporteerd.

## 7 Kennisontsluiting

In (De Ronde *et al.*, 2013) is gekozen om het statistische model in een webtool om te vormen. Het doel van de webtool is kennisborging, reproduceerbaarheid en exploratie.

De rapportagefrequentie van de zeespiegel is relatief laag. Door deze lage frequentie is het van belang om de kennis goed te borgen. Het borgen van kennis gebeurt op verschillende manieren, door te rapporteren, te publiceren, maar ook door te programmeren. Net als de laatste stand van kennis over fysische processen, wordt ook de laatste stand van kennis over trendbepaling van de zeespiegel gevat in computer code. Het voordeel hiervan is dat het meteen toe te passen is voor andere stations (de niet hoofdstations) en stations in het buitenland.

Een andere kwestie is dat het thema van de zeespiegel gevoelig ligt. Dit komt omdat er sterkere verwachtingen zijn bij klimaat-gerelateerde kengetallen. In een dergelijke context is het van belang om extra aandacht te besteden aan de wetenschappelijke methode. Hierbij moet gelet worden op reproduceerbaarheid en verwerpbaarheid. Door de rekenmethode transparant op het internet te zetten kan eenieder deze reproduceren en indien nodig verfijnen of verwerpen.

Door het model dat de zeespiegelstand uitrekent interactief te maken kunnen de eigenschappen van het model beter begrepen worden. Het biedt de mogelijkheid om te exploreren, wat de kans vergroot dat een nog betere methode wordt gevonden.

De vraag rees hierbij wat een goede plek is om dergelijke webtools onder te brengen. In de afgelopen 5 tot 10 jaar is een rijke diversiteit aan platformen gegroeid via welke kengetallen over het Nederlandse water- en kustbeheer worden ontsloten. De webtools staan bekend onder verschillende namen als “dashboards”, “apps”, “portals”, “sites”. Er zijn een aantal kenmerken die relevant zijn. Deze lijst van kenmerken is samengesteld op basis van de lijst van Marc Philipaert (NMDC-vis-2014) uit de algemene beschouwing van viewers.

**Rolverdeling** Overheidstaak, taak van kennisinstituut of markttaak.

**Domein** overheidssite of externe site.

**Hosting** overheidscomputer of externe computer

**Statisch** biedt de informatie statische of interactieve informatie

**Techniek** bestaande uit Centrale Informatievoorziening (CIV)-componenten of met andere technieken

**Beschikbaarheid** Moet de website continu in de lucht zijn of meestal.

**Doelgroep** specialist of algemeen publiek

**Primair** zijn gegevens voor primaire proces of zijn het afgeleide gegevens

**Openheid** open of gesloten (code, data, licentie)

**Standaardisatie** gegevensuitwisseling op basis van standaarden

**Dekking** nationaal of internationaal

De rolverdeling die de overheid tegenwoordig graag ziet is in de vorm van de gouden driehoek (combinatie van marktpartijen, overheid en kennis). Deltares heeft bij de vorming ook een missie meegekregen waarbij het nadrukkelijk niet de bedoeling is om binnen de nationale markt activiteiten uit te voeren die ook door marktpartijen uitgevoerd kunnen worden. De visie van de marktpositionering van webtools is nagevraagd bij drie marktpartijen die regelmatig webtools leveren. Van deze partijen hebben er twee gereageerd. Hieruit kwamen de volgende overwegingen naar voren:

Beide partijen geven aan de rol van het aanbieden van kengetallen voor RWS graag uit te voeren en dit als een rol van de markt te zien. De partijen ontsluiten diverse kengetallen die afgeleid zijn van RWS data. Deze worden veelal via url's aangeboden die niet onder het RWS domein vallen. Gegevens voor specialisten worden nu nauwelijks via [rws.nl](http://rws.nl) rechtstreeks aangeboden.

De partijen hebben verschillende benaderingen van hosting bij RWS. De CIV heeft een aanpak waar applicaties niet, gedeeltelijk of geheel bij RWS ondergebracht kunnen worden. De CIV biedt de volgende mogelijkheden, die aansluiten bij de gebruikelijke Infrastructure as a Service (IaaS), Platform as a Service (PaaS), Software as a Service (SaaS) aanpakken:

**geen service** de applicatie draait buiten RWS. Hierbij is de leverancier verantwoordelijk voor beheer van infrastructuur, besturingssysteem en beheer van de applicatie.

**IaaS** de CIV biedt een computer ter beschikking aan met een besturingssysteem (windows/linux). De leverancier is verantwoordelijk voor het beheer van de applicatie.

**PaaS** de CIV biedt een platform ter beschikking met bouwstenen (database, webserver). De leverancier kan een applicatie hier binnen draaien en is daar verantwoordelijk voor.

**SaaS** de CIV biedt de software aan als standaard bouwsteen. De CIV biedt de applicatie aan en is er verantwoordelijk voor.

De partijen verschillen in welke mogelijkheid van deze lijst kiezen. Deze zeespiegelmonitor zou aan kunnen sluiten op de IaaS aanpak. Dit omdat van diverse componenten gebruik gemaakt wordt die nog niet in de lijst van bouwstenen van de CIV zit. Het gebruik van de componenten en technieken zoals deze door de zeespiegelmonitor worden gebruikt (python voor plots, html5 voor presentatie, R voor statistische berekenen, OPeNDAP als database) sluiten wel aan bij bouwstenen zoals in gebruik bij de verschillende partijen.

De partijen maken steeds meer gebruik van interactieve modellen, waar de zeespiegel monitor ook een voorbeeld van is. Ook worden de "berekening als dienst" aanpak in verschillende vormen gebruikt.

De meeste viewers, met uitzondering van operationele toepassingen, zijn niet gegarandeerd beschikbaar. Voor de zeespiegelmonitor is dat ook niet nodig.

Op dit moment worden de hoogfrequente metingen aangeboden via waterbase (<http://live.waterbase.nl>). De daar uit afgeleide jaargemiddelden zijn op aanvraag beschikbaar via helpdesk water. Om opgenomen te mogen worden in de geverifieerde internationale database van zeespiegelstanden (PSMSL) moet de NAP correctie worden toegepast. Deze gegevens zijn in de laatste jaren door Deltares aangeleverd. Dit soort informatie stromen zijn niet altijd geborgd. We adviseren de informatie stroom naar de internationale dataset te verifiëren.



Suggesties voor de website waar de zeespiegel gegevens ontsloten kunnen worden zijn de “waterviewer”, een algemeen waterinformatie portaal voor het algemene publiek, het deltaportaal of voor specialisten de “kustviewer” of het “dijk data service center”. De openheid van de viewers varieert. De zeespiegel monitor is onder een vrije licentie ontwikkeld en past daardoor in een open source viewer.

Er is een rijke diversiteit aan viewers beschikbaar waar de gegevens onder gevat kunnen worden. De “kustviewer”, “het deltaportaal” en “waterviewer” lijken logische kandidaten.

Van deze viewers is de kustviewer het meest gericht op specialisten. De waterviewer is niet op basis van open source software gemaakt waardoor de aansluiting lastiger zal zijn. Het deltaportaal is meer op planvormers gericht.

De viewers maken steeds meer gebruik van open standaarden, vooral standaarden vanuit de Open Geospatial Consortium (OGC). De meeste viewers hebben een nationaal karakter.

Internationaal worden kengetallen over de zeespiegel en de data gedistribueerd via PSMSL. Het zou wenselijk zijn als van de [psmsl.org](http://psmsl.org) een verwijzing zou krijgen naar de webtool.

## 7.1 Advies

Binnen Rijkswaterstaat is een evaluatie van de verschillende viewers gaande. We adviseren om de criteria van openheid en standaardisatie toe te voegen aan deze evaluatie.

Op dit moment past de zeespiegel monitor het beste in de kustviewer. Deze is als open software beschikbaar is, gebruikt dezelfde technieken als de zeespiegelmonitor, is bedoeld voor specialisten. Door een scheiding aan te leggen tussen de gegevens, de rekenmethode en de viewer, zou de viewer ook passen in de “waterviewer”. De meeste viewers hebben een relatief korte halfwaardetijd. Ook hierom is het raadzaam is deze scheiding aan te brengen. We raden daarnaast aan met de PSMSL te overleggen of de webtool ook aansluiting bij hun website kan vinden.



## 8 Aanbevelingen

Op basis van het eerdere bevelen we het volgende aan.

Op dit moment wordt het huidige hoogwaterniveau bepaald op basis van recente trends in het hoogwater. Het valt te overwegen om de huidige zeespiegel en de huidige getijconstituenten apart te beschouwen.

In beleid worden verschillende voorspelvormen (scenario's, projecties, voorspellingen) gebruikt. In de communicatie van de wetenschap naar het algemene publiek wordt niet eenduidig geïnformeerd over de waarde die kan worden toegekend aan een uitspraak over de toekomst. Het is raadzaam om voor de verschillende voorspelvormen consequente definities te gebruiken.

Vanuit het buitenland, bijvoorbeeld UK environment agency, is er veel interesse in de Nederlandse benadering van het gebruik van zeespiegel kengetallen. We adviseren om de beleidsmatige toepassing en wetenschappelijke uitbreidingen te publiceren in de relevante vakbladen.

We adviseren om het model zoals besproken in hoofdstuk 4 als standaard rekenmethode te gebruiken voor suppletie beleid. Dat wil zeggen een lineair regressie model volgens vergelijking 4.1, met als databronnen

- 1 de zeespiegelstanden zoals aangeleverd aan de PSMSL, teruggerekend naar NAP post 2005, gemiddeld over de 6 hoofdstations (Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen)
- 2 met de inverse barometer correctie toegepast op basis van luchtdrukken uit de NCEP/NCAR heranalyses, met als referentie punt het referentie punt (56.1893ř, 1.8750ř)
- 3 met meegenomen de over het jaar gemiddelde gekwadraterde windsnelheid uitgesplitst in cartesische componenten U en V op basis van de NCEP/NCAR heranalyses, met als referentie punt (56.1893ř, 1.8750ř)
- 4 met meegenomen het nodale getij, met vrije fase en amplitude op basis van de vaste periode 18.613 jaar
- 5 met op de residuen toegepast een lineaire LOESS met een span overeenkomend met 60 jaar gedeeld door de lengte van tijdreeksen in jaren.
- 6 voor de schatting van het betrouwbaarheidsinterval in de toekomst kan de betrouwbaarheid van de lineaire trend uit het verleden, op basis van het station in Amsterdam worden meegenomen.

we adviseren te verifiëren of de informatie stroom (van getij gegevens) naar de internationale dataset PSMSL vanuit Nederland ook voor 2014 correct zal verlopen (via RWS of Deltares).

De peilmeetstations laten elk een andere zeespiegelstijging zien. De oorzaak hiervan staat niet vast. De bodemdaling langs de Nederlandse kust verklaart de verschillen niet, concludeerde [De Ronde et al. \(2013\)](#). We adviseren de regionale verschillen verder te onderzoeken.

We adviseren om te overwegen of het tijd is om het controle volume van de BKL te herzien.

Met dit rapport wordt een schatting van kansverdelingen op zeespiegel stijgingen over de tijd. We adviseren om te onderzoeken hoe deze gebruikt kunnen worden voor het ontwerpen van een doelmatige kustverdediging. Daarbij kunnen adaptieve ontwerpen en ontwerpen volgens het voorzorgsprincipe vergeleken worden.

In andere landen is gebleken dat het onttrekken van grondwater, olie en gassen een effectieve manier is om extra relatieve zeespiegelstijging te veroorzaken. Door gas te onttrekken neemt de druk in de bodem af waardoor de bodem inzakt. In Nederland vinden de grootste onttrekkingen in Groningen plaats. Bodemdaling in de Waddenzee is niet direct zichtbaar omdat de Waddenzee zand onttrekt aan het kustfundament. De dalingen worden door deze zandtoevoer weer opgevuld. We adviseren om te onderzoeken in welke mate de gaswinningen een achterstand in het onderhoud van het kustfundament veroorzaken.

We raden aan om de administratie van het veronderstelde volume van het kustfundament met schattingen van de gestegen zeespiegel te synchroniseren.

## 9 Literatuur

- Baart, F., M. van Koningsveld and M. J. F. Stive, 2012. "Trends in Sea-Level Trend Analysis." *Journal of Coastal Research* 28 (2): 311–315. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-11A-00024.1>. 6, 18
- Box, G. E. and G. C. Tiao, 2011. *Bayesian inference in statistical analysis*, vol. 40. John Wiley & Sons. 27
- Bruijne, A. de and N. C. voor Geodesie, 2005. *De geodetische referentiestelsels van Nederland: definitie en vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties*. NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie. 4
- Church, J. A. and N. J. White, 2011. "Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century." *Surveys in Geophysics* 32: 585–602. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>. 5
- Cleveland, W., E. Grosse and W. Shyu, 1992. *Statistical models in S*, chap. Local regression models, pages 309–376. Wadsworth & Brooks. 20
- Compo, G. P., J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, N. Matsui, R. Allan, X. Yin, B. Gleason, R. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin *et al.*, 2011. "The twentieth century reanalysis project." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137 (654): 1–28. 10
- De Ronde, J., F. Baart, C. Katsman and V. Vuik, 2013. *Zeespiegelmonitor*. Tech. Rep. 1208712–000, Deltares, HKV en KNMI. 1, 4, 5, 9, 10, 14, 17, 18, 33, 37
- Deltacommissie, 2008. *Samen werken met water: een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst; bevindingen van de Deltacommissie 2008*. S.n, S.l. URL <http://www.deltacommissie.com/doc/2008-09-03%20Advies%20Deltacommissie.pdf>. 8
- Dillingh, D., B. Fedor and J. de Ronde, 2010. *Definitie zeespiegelstijging voor bepaling supplementiebehoefte*. Tech. Rep. 1201993–002, Deltares. 1, 2, 4, 5, 9, 17, 25
- Douglas, B. C., 1992. "Global Sea-Level Acceleration." *Journal of Geophysical Research-Oceans* 97 (C8): 12699–12706. URL <http://dx.doi.org/10.1029/92JC01133>. 18
- Gerritsen, H. and H. van den Boogaard, 2007. "Estimation of trend breaks and their uncertainties in water level series for design purposes." In *PROCEEDINGS OF THE CONGRESS-INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH*, vol. 32, page 755. 18, 22
- Gregory, J. M., N. J. White, J. A. Church, M. F. P. Bierkens, J. E. Box, M. R. van den Broeke, J. G. Cogley, X. Fettweis, E. Hanna, P. Huybrechts, L. F. Konikow, P. W. Leclercq, B. Marzeion, J. Oerlemans, M. E. Tamisiea, Y. Wada, L. M. Wake and R. S. W. van de Wal, 2012. "Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts?" *Journal of Climate* 26 (13): 4476–4499. URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00319.1>. 20
- Hay, C. C., E. Morrow, R. E. Kopp and J. X. Mitrovica, 2015. "Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise." *Nature* advance online publication: –. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature14093>. 20

- Hollebrandse, F. A., 2005. *Temporal development of the tidal range in the southern North Sea*. Master's thesis, Delft University of Technology. 4
- Houston, J. R. and R. G. Dean, 2011. "Sea-Level Acceleration Based on U.S. Tide Gauges and Extensions of Previous Global-Gauge Analyses." *Journal of Coastal Research* pages 409–417. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-10-00157.1>. 5
- Hurk, B. van den, P. Siegmund, A. K. Tank, J. Attema, A. Bakker, J. Beersma, J. Bessembinder, R. Boers, T. Brandsma, H. van den Brink, S. Drijfhout, H. Eskes, R. Haarsma *et al.*, 2014. *KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century—A Netherlands perspective*. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. 2
- Jevrejeva, S., J. Moore, A. Grinsted, A. Matthews and G. Spada, 2014. "Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807." *Global and Planetary Change* 113 (0): 11 – 22. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818113002750>. 5, 18
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken, 2013. *Deltaprogramma 2014: Werk aan de delta*. Tech. rep., Deltaprogramma Kust. 1
- , 2014. *Deltaprogramma 2015: Werk aan de delta*. Tech. rep., Deltaprogramma Kust. 1
- Nederbragt, G., 2005. "Zandvoorraden van het kuststelsel." *Rapport RIKZ*. 3
- Page, S. E., 2010. *Diversity and complexity*. Princeton University Press. 25
- Phillips, L., 2012. "Sea versus senators." *Nature* 486 (7404): 450–450. 5
- R Core Team, 2014. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. 18
- Rahmstorf, S. and M. Vermeer, 2011. "Discussion of: Houston, J.R. and Dean, R.G., 2011. Sea-Level Acceleration Based on U.S. Tide Gauges and Extensions of Previous Global-Gauge Analyses. *Journal of Coastal Research*, 27(3), 409–417." *Journal of Coastal Research* pages 784–787. URL <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-11-00082.1>. 6
- Rijkswaterstaat, 2007. *Hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006)*. Tech. rep., Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 4
- Rijkswaterstaat, D.-G., 2000. *3e Kustnota: Traditie, trends en toekomst*. Tech. rep., Ministerie van Verkeer and Rijkswaterstaat en Waterstaat. 1, 3
- Ronde, J. de, 2008. *Toekomstige langjarige suppletiebehoefte*. Tech. Rep. Z4582.24, Deltares. 1, 3
- Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*. Tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change. 2
- Vautard, R., J. Cattiaux, P. Yiou, J. Thépaut and P. Ciais, 2010. "Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness." 3 (11): 756–761. 10
- Verkeer en Waterstaat, 2008. *Nationaal Waterplan*. Tech. rep., Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. 1, 5

- Vries, H. de, C. Katsman and S. Drijfhout, 2014. "Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways." *Environmental Research Letters* 9 (11): 115007. URL <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=11/a=115007>. 4, 10, 25, 29
- VROM, 2004. *Nota Ruimte – Ruimte voor Ontwikkeling*. Tech. rep., Ministeries van VROM, LNV, VenW en EZ. PKB Nationaal Ruimtelijk Beleid. 1, 3
- Wever, N., 2012. "Quantifying trends in surface roughness and the effect on surface wind speed observations." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* 117 (D11). 10





## Acroniemen

<b>BKL</b>	Basis KustLijn
<b>BMA</b>	Bayesian Model Averaging
<b>CIV</b>	Centrale Informatievoorziening
<b>EZ</b>	Ministerie van Economische Zaken
<b>HKV</b>	HKV Lijn in water
<b>IHM</b>	Informatie huis marien
<b>IHW</b>	Informatie huis water
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>IV</b>	Informatie Voorziening
<b>laaS</b>	Infrastructure as a Service
<b>lenM</b>	Ministerie van Infrastructuur en Milieu
<b>KNMI</b>	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
<b>LOESS</b>	locally weighted regression
<b>MDN</b>	Mixture density networks
<b>NAP</b>	Normaal Amsterdams Peil
<b>NCEP</b>	National Centers for Environmental Prediction
<b>NCAR</b>	National Center for Atmospheric Research
<b>NWP</b>	Nationaal Water Plan
<b>OGC</b>	Open Geospatial Consortium
<b>PGB</b>	Postglaciale bodembeweging
<b>PSMSL</b>	Permanent Service for Mean Sea Level
<b>PVDA</b>	Partij van de Arbeid
<b>PaaS</b>	Platform as a Service
<b>RWS</b>	Rijkswaterstaat
<b>SaaS</b>	Software as a Service
<b>TGBM</b>	Tide Gauge Benchmark
<b>RLR</b>	Revised Local Reference
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984

**EGM96** Earth Gravitational Model 1996

**ETRS89** European Terrestrial Reference System 1989

**EGM2008** Earth Gravitational Model 2008

**MSL** Mean Sea Level

**NLGeo2004** Nederlands Geoïdemodel 2004

**AGRS.NL** Actief Global Navigation Satellite System (GNSS) Referentie Systeem

**GNSS** Global Navigation Satellite System

**RD** Rijksdriehoekstelsel