

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

4.1.1 Vlissingen



Meetstation Vlissingen

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

4.1.2 Hoek van Holland



Meetstation Hoek van Holland

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

4.1.3 IJmuiden



Meetstation IJmuiden

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

4.1.4 Den Helder



Meetstation Den Helder

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

4.1.5 Harlingen



Het getijstation in Harlingen bevindt zich in de haven op de boulevard. Op een diepte van -2.56m NAP loopt een pijp van het station naar zee. De inlaat van de buis wordt beschermd door een constructie, om de variaties door de golfinslag te verminderen. Het hoofdgebouw heeft een fundament van een stalen damwandconstructie met rechthoekige binnenafmetingen 2.53 x 2.27 m² rondom de meetinstrumenten. De 28m lange nulpaal staat op een diepte van 22m. In de buurt van dit station start zoutwinning.

Meetstation Harlingen

4.1.6 Delfzijl

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



Meetstation in Delfzijl

4.2 Verticale referentieniveaus

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

4.2.1 Het **NAP** en de nulpalen

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

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

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

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

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

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

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

4.2.2 NAP historie

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

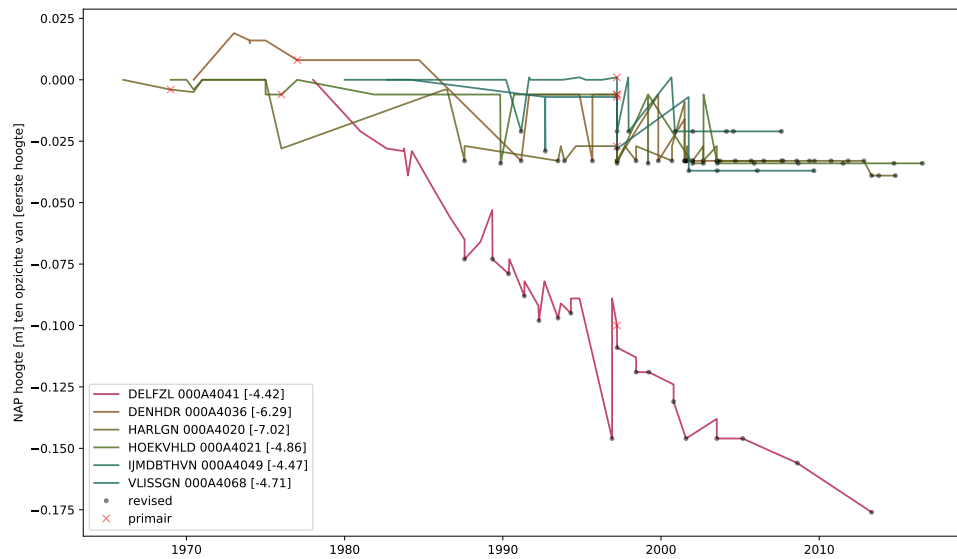
In fig. 4.4 zien we dat de peilmerken in de buurt van de nulpaal van Hoek van Holland van hoogte veranderen. Dit laat zien dat niet alle peilmerken een vaste hoogte hebben gehad. We zien dat de punten dalen. Dit zou logischerwijs bodemdaling tussen de hoogte van de nulpaal en de hoogte van de peilmerken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

4.3 Satellieten

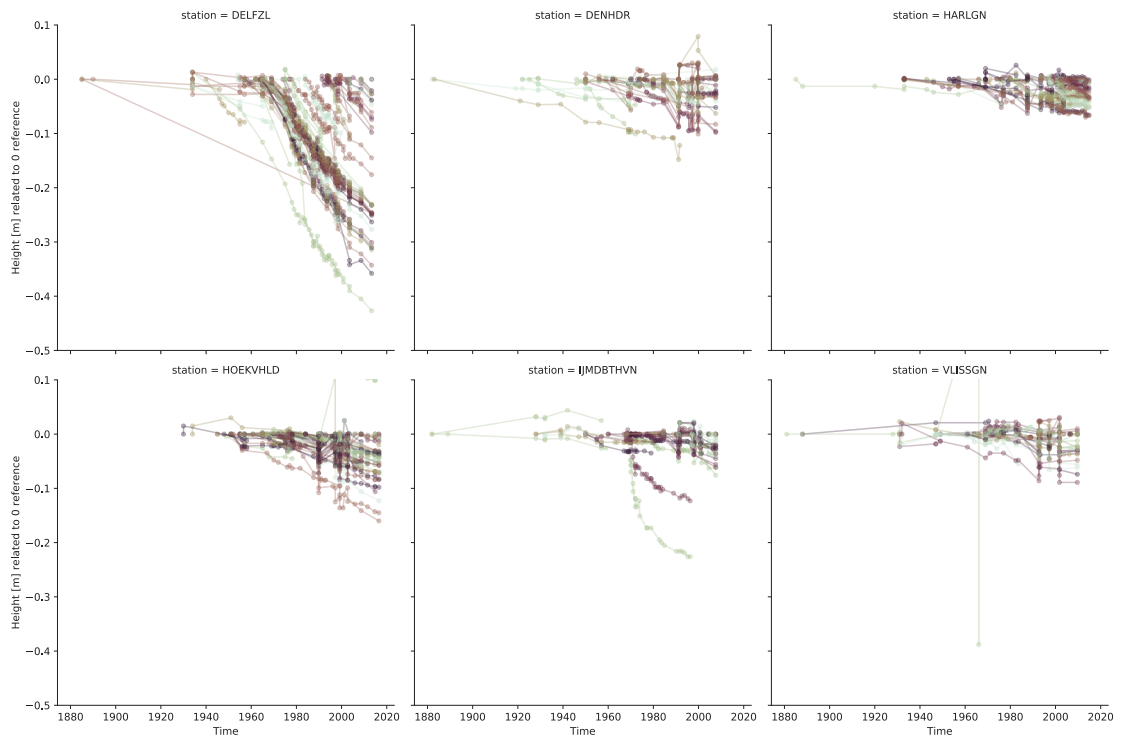
Deze sectie geeft een overzicht van satellietmetingen van de zeehoogte (altimetrie). De altimetrie satellieten zijn begonnen met meten in 1992, met de lancering van de TOPEX/Poseidon satelliet. Over de afgelopen decennia is met meerdere satellieten de zeehoogte vastgesteld. De satellieten beschikken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

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

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



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



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

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

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

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

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

5 Methoden voor de bepaling van de huidige zeespiegel

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

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

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

Stabiliteit methode moet niet van jaar tot jaar te veel variëren

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

Robuustheid trend moet niet te veel afhangen van modelkeuzes en periodes

Voorspelkracht toepassing van model in het verleden een goede hindcast opleveren

Behoudend methode moet temporeel aansluiten

Generaliseerbaarheid methode moet ook werken bij andere stations dan in Nederland

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

5.1 Welk model?

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

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

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

5.2 Welke data?

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

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

We maken geen onderscheid naar in welke mate de stations zijn beïnvloed door de diverse ingrepen aan de Nederlandse kust. Er hebben diverse kleinere en grotere ingrepen plaatsgevonden die invloed hebben op de metingen. Denk hierbij aan de aanleg van de Afsluitdijk, de aanleg van de Deltawerken, sinds de jaren 1990 het dynamisch kustbeheer en vooral de diverse lokale aanpassingen binnen de havens. Deze effecten onderscheiden we niet.

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

5.3 Welke tijdschaal?

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

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

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

5.4 Welke termen?

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

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

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

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

5.4.1 Constante en trend

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

5.4.2 Versnelling?

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

Aansluitend op de literatuur worden twee varianten vergeleken:

- 1 Een kwadratische versnelling. Dit is de gebruikelijke ([Jevrejeva et al., 2014](#); [Church and White, 2011](#)) en formele manier om de versnelling mee te nemen. De methode bevat naast een parameter voor de lineaire trend in de zeespiegelstijging een extra parameter voor de versnelling in de zeespiegelstijging (zie verg. [\(5.1\)](#)). Op de significantie van deze parameter wordt statistisch getoetst. Deze methode wordt weergegeven met verg. [\(5.3\)](#)
- 2 Een trendbreuk in 1993. Het jaar 1993 markeert het begin van het satelliettijdperk ('satellite era') met de start van de TOPEX/Poseidon metingen. Dit lijkt een wat arbitraire keuze. De motivatie is als volgt. De satellietmetingen laten een hogere zeespiegelstijging zien dan de gemeten waterstanden in het getijstationtijdperk ('tide gauge era'). Hierbij wordt 1993 vaak genoemd als de start van de versnelde zeespiegel (bijvoorbeeld [Stocker et al., 2013b](#)). Om goede vergelijkingen te maken is het daarom nodig om ook voor deze periode een trend te bepalen. In deze methode kan de trendparameter vanaf het jaar 1993 wijzigen. Op de significantie van de trendbreuk wordt statistisch getoetst. Dit gebroken trend model wordt weergegeven in verg. [\(5.4\)](#).

De uiteindelijke modelkeuze (welk model is beter?) vindt plaats op twee criteria. Er moet sprake zijn van een significante acceleratie of deceleratie en er moet sprake zijn van een beter model. Dat laatste wordt vastgesteld met behulp van het Akaike Informatie Criterium (AIC), waarbij een afweging wordt gemaakt tussen de complexiteit en de toegevoegde waarde.

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

5.5 Getij

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

5.6 Wind

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

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

5.7 Residu

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

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

5.8 Gedetailleerde vergelijking

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

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

Hierbij is h_t de zeewaterstand in jaar t , $\beta_{\text{constante}}$ is het niveau van de basis zeespiegel in de epoch 1970. gedefinieerd. Parameter β_{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 β_{nodal_u} en β_{nodal_v} , (zie [Baart et al., 2012a](#), voor details). De parameters β_{wind_u} en β_{wind_v} representeren de invloed van de wind en de daarmee samenhangende luchtdruk. De term φ is de autocorrelatie met de zeespiegelstand van het voorgaande jaar. Voor de term *versnelling?* kan voor de kwadratische versnelling de volgende term ingevuld worden:

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

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

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

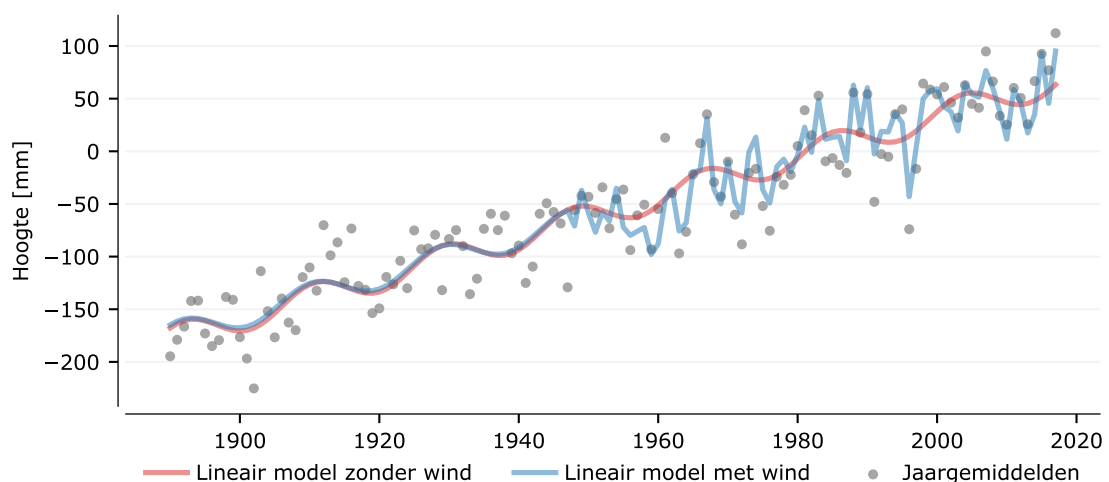
6 Resultaten: de huidige zeespiegel

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

6.1 De huidige zeespiegel

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

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



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

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

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

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

6.2 Versnelt de zeespiegelstijging?

Of er een versnelling is stellen we vast door de modellen met versnelling (met acceleratieterm en met knik) te vergelijken met het model zonder versnelling. Geen van beide versnellingsmodellen zijn een significante verbetering ten opzichte van het model zonder versnelling. Dat wil zeggen dat we onder de aanname dat er geen versnelling is een acceleratie of knik hadden verwacht zo groot als we die gezien hebben. Beide modellen zijn vanuit de AIC vergelijking wel een beter model. Zoals beschreven in sectie 5.4.2 kiezen we op basis van de combinatie van deze twee criteria voor het model zonder versnelling. Het model met een acceleratie term laat een vertraagde zeespiegel zien (-0.0001 ± 0.0040 mm/jaar²). Het model met een knik in 1993 laat een hogere zeespiegel zien 2.4mm/jaar na 1993 dan ervoor 1.8mm/jaar, een extra 0.63 ± 0.75 mm/jaar.

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

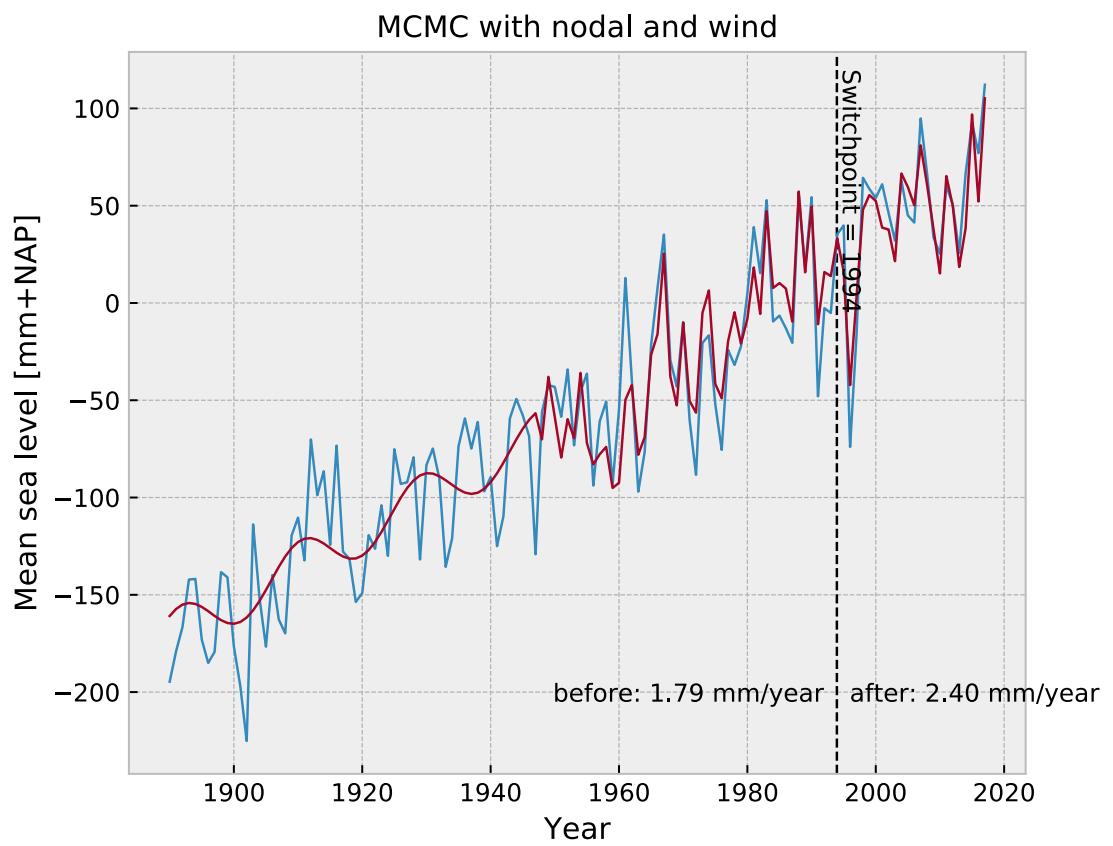
6.3 Wanneer gaan we de versnelling zien als deze heeft plaatsgevonden?

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

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

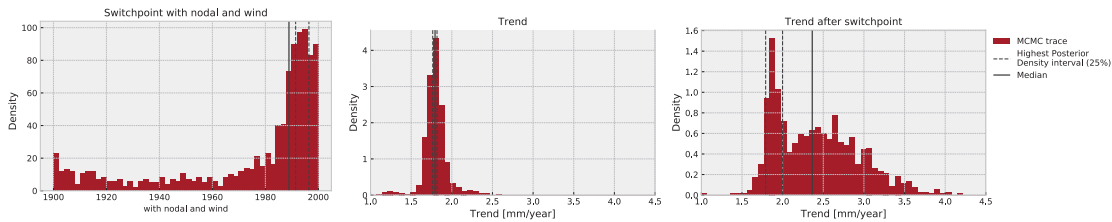
De a-posteriori kansverdeling van het knikpunt en de trends voor en na zijn te vinden in fig. 6.3. Hierin kunnen we aflezen dat het meest waarschijnlijke knikpunt in 1994 lag. De kansverdelingen van de trend voor en na overlappen dusdanig dat we concluderen dat de trend voor en na niet anders zijn. Als de trend na nog 0.5mm/jaar toeneemt dan zou deze nu al significant zijn geweest. Datzelfde geldt als deze trendverandering nog 20 jaar doorzet en een verschil maakt van 2.5 cm. Hoe meer metingen we verzamelen, hoe smaller het interval wordt. Ook het beter verklaren van de residuen, door de windeffecten met GTSM te schatten, zal de kans op versnellingsdetectie doen toenemen.

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



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

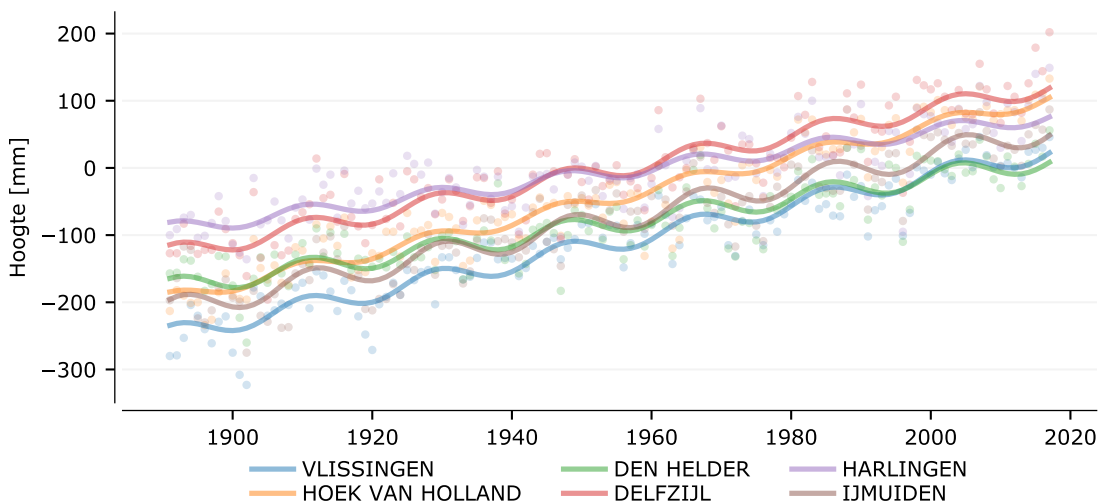
zijn dat een versnelling was gedetecteerd. Als de zeespiegel 0.5mm/jaar extra was gestegen (overeenkomstig met een R^2 van 0.913 ten opzichte van de huidige 0.909), dan was de kans meer dan 80% dat we nu een significante versnelling hadden gezien. Het huidige breekpunt model verklaart slechts 0.1% extra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



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

6.4 Per station

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



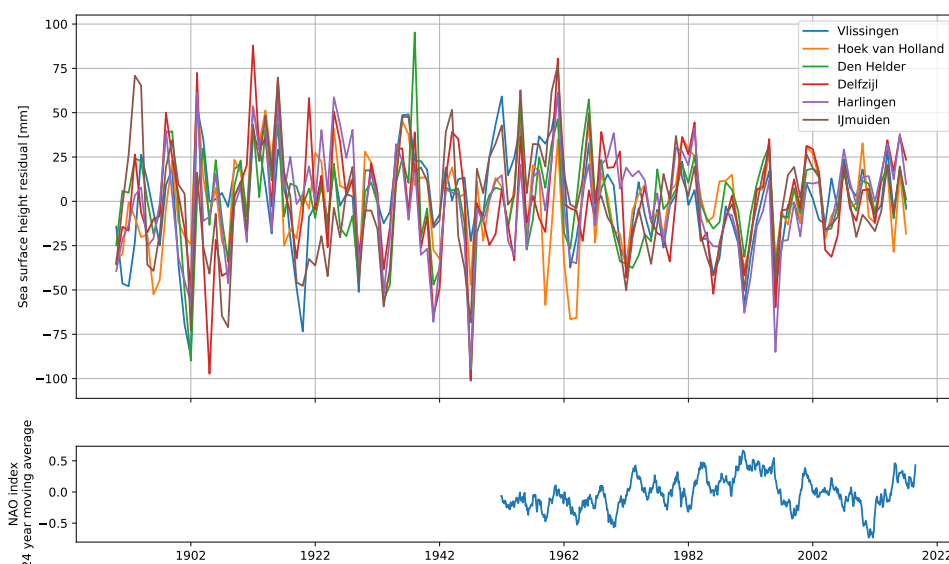
Figuur 6.4: Huidige zeespiegelstijging volgens het lineaire model zonder wind. De trend is voor de 6 getijdstations afzonderlijk weergegeven. Zie ook [\[1\]](#) voor een interactieve variant van deze grafiek waarmee individuele stations geselecteerd kunnen worden. De zeespiegel is uitgedrukt ten opzichte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

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

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

Tabel 6.2: Zeespiegel trends per station.

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



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

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

6.5 Bodemdaling of zeespiegelstijging?

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

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

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

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

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

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

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

6.6 Scenario's versus de huidige zeespiegel

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

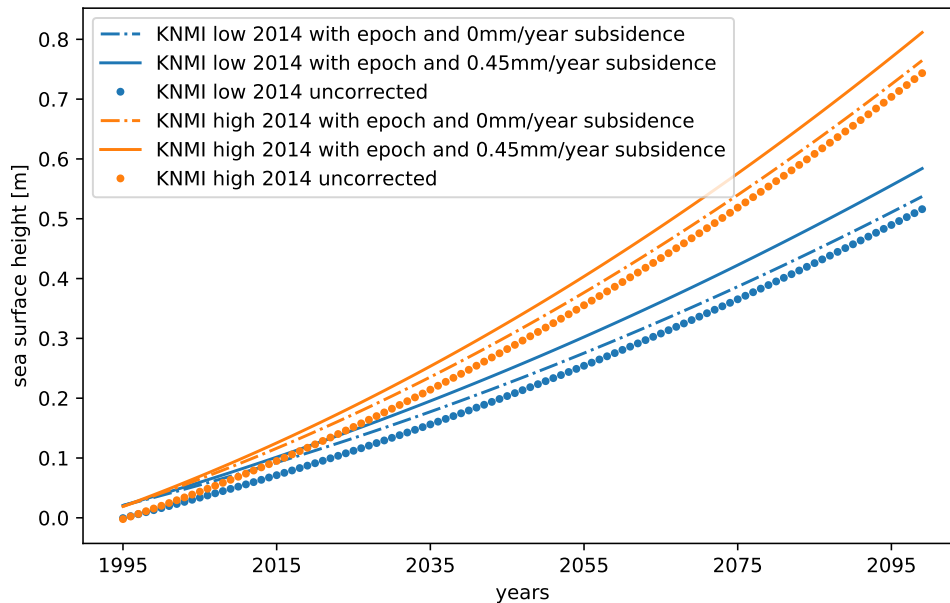
Absoluut De zeespiegelscenario's hebben betrekking op de absolute zeespiegel. Als we deze willen vergelijken met de getijdestations moeten we, of van de metingen de bodemdaling af halen, of bij de scenario's de bodemdaling optellen. In fig. 6.7 doen we het laatste, omdat we hier kijken vanuit de toepassing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

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

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

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

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



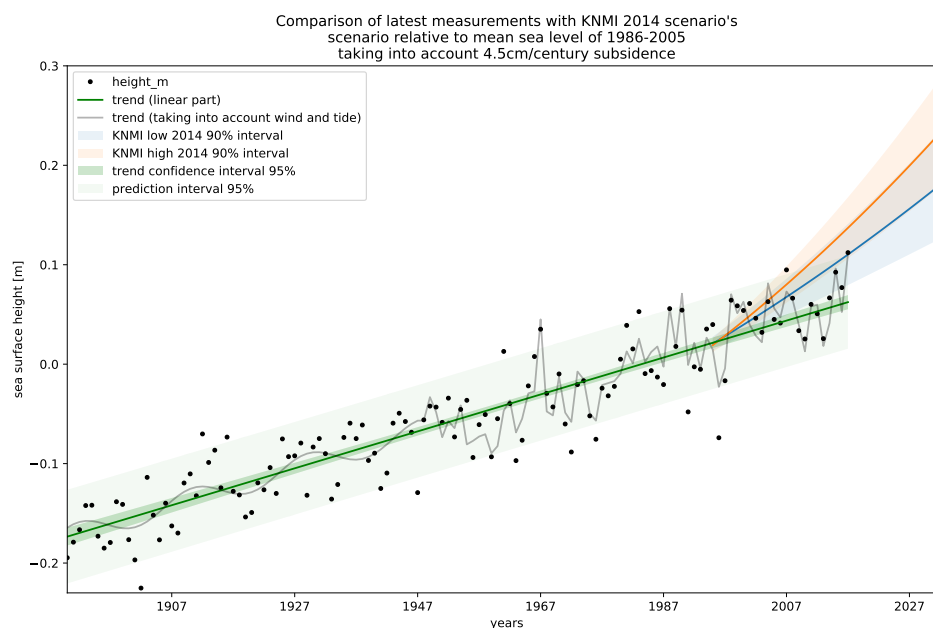
Figuur 6.6: Toegepaste correcties om KNMI 2014 zeespiegelscenario's (Van den Hurk et al., 2014) vergelijkbaar te maken met relatieve zeespiegelstijging van de getijdestations.

In fig. 6.7 zien we dat als we rekening met bovenstaande aspecten dat de huidige zeespiegel nu aan de onderkant ligt van het laagste scenario. De zeespiegel aan de Nederlandse kust is dus minder gestegen dan waar in de twee KNMI scenario's van uit werd gegaan. Dit betekent niet dat de scenario's niet kloppen, het waren immers studies die mogelijke toekomstige condities berekende (het zou kunnen dat, met de kennis van toen).

Gegeven dat de poolkappen massa verliezen en de aarde opwarmt, verwachten we nog steeds een versnelde zeespiegel. De conclusie is wel dat we achter liggen op schema.

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

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



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

6.7 Nederland versus buurlanden

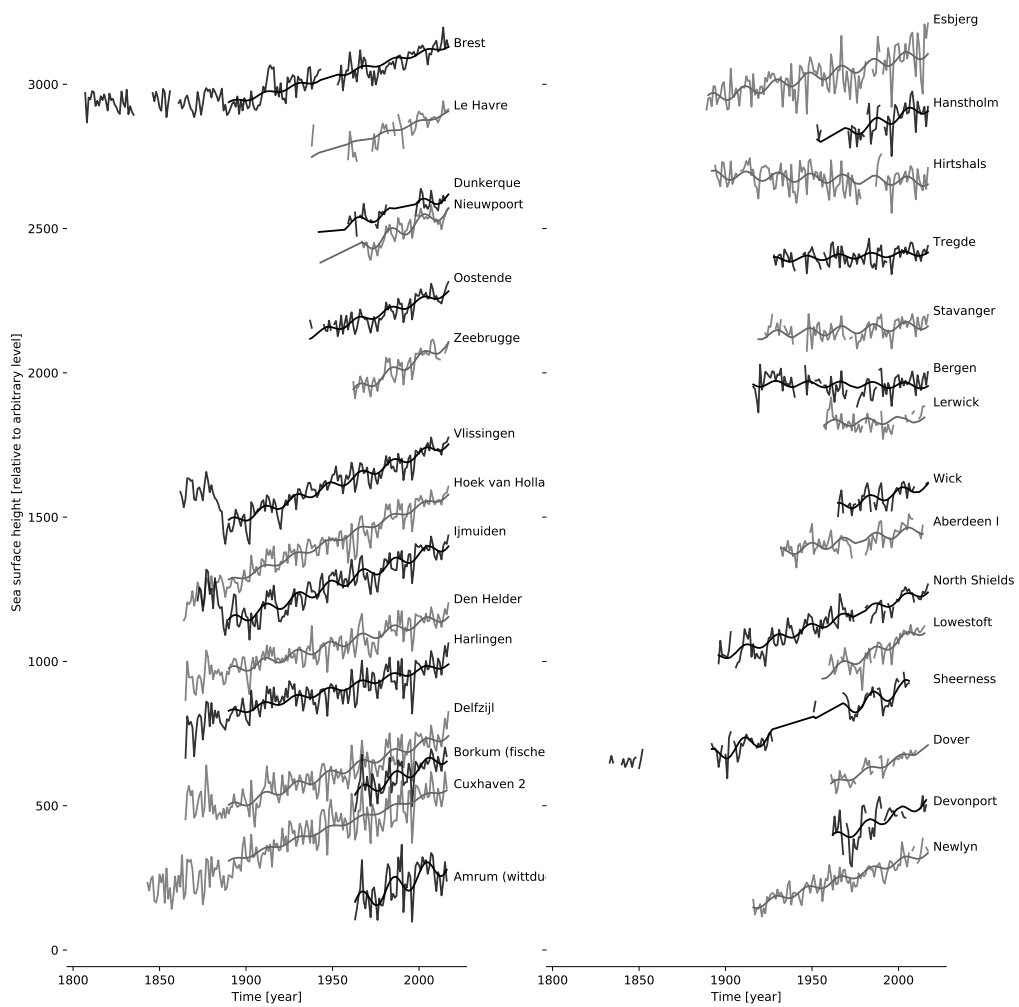
Naast Nederland hebben ook de andere landen die aan de Noordzee liggen een historie van metingen van de zeespiegel. De stations laten een consistent beeld zien van een zeespiegelstijging in de orde van 15cm/eeuw Wahl et al. (2013). In fig. 6.8 zien we dat de stations grotendeels dezelfde variatie laten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


6.8 Nederland versus globaal

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

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

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

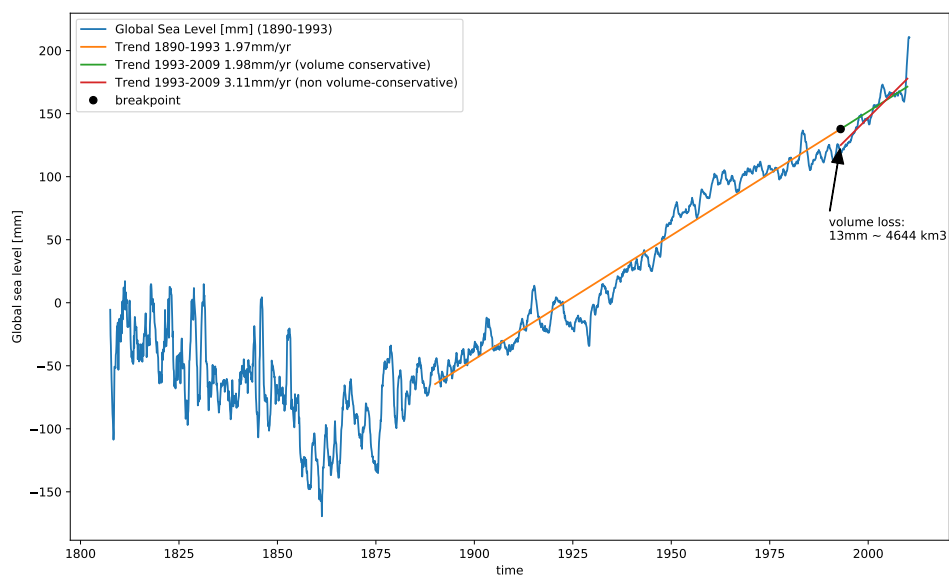


Figuur 6.8: Zeespiegelmetingen van diverse stations in Frankrijk, België, Denemarken, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk. 

(Jevrejeva *et al.*, 2014).

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

Een mogelijke verklaring voor de discrepantie tussen de resultaten van [Houston and Dean \(2011\)](#) en [Jevrejeva *et al.* \(2014\)](#) zit in hoe omgegaan wordt met het aansluiten van periodes (volume-conservatieve trends versus niet volume conservatieve trends). Indien trends uitgerekend worden over een periode zonder deze aan te laten sluiten met de periode ervoor kan een gat ontstaan tussen twee curves. Zonder behoud van volume is de zeespiegelstijging over de periode 1993-2009 met 3.1mm gestegen. Met behoud van volume is de zeespiegelstijging over dezelfde periode gelijk aan ervoor, zie fig. 6.9. Volume conservatieve trends kunnen berekend worden door eerst de trend over de beginperiode uit te rekenen en door bij de volgende periode een vast nulpunt op te leggen of door een gebroken trendmethode toe te passen [\[1\]](#).



*Figuur 6.9: De zeespiegelstijging op basis van de reconstructie van [Jevrejeva *et al.* \(2014\)](#), met en zonder behoud van volume. De groene curve is berekend op basis van de volumebehoudende methode, waarbij het zwarte punt als beginpunt van de curve na 1993 is opgenomen. Bij de rode curve is in 1993 4644km³ verloren gegaan. De rode curve komt overeen met de trend uit [Jevrejeva *et al.* \(2014\)](#).*

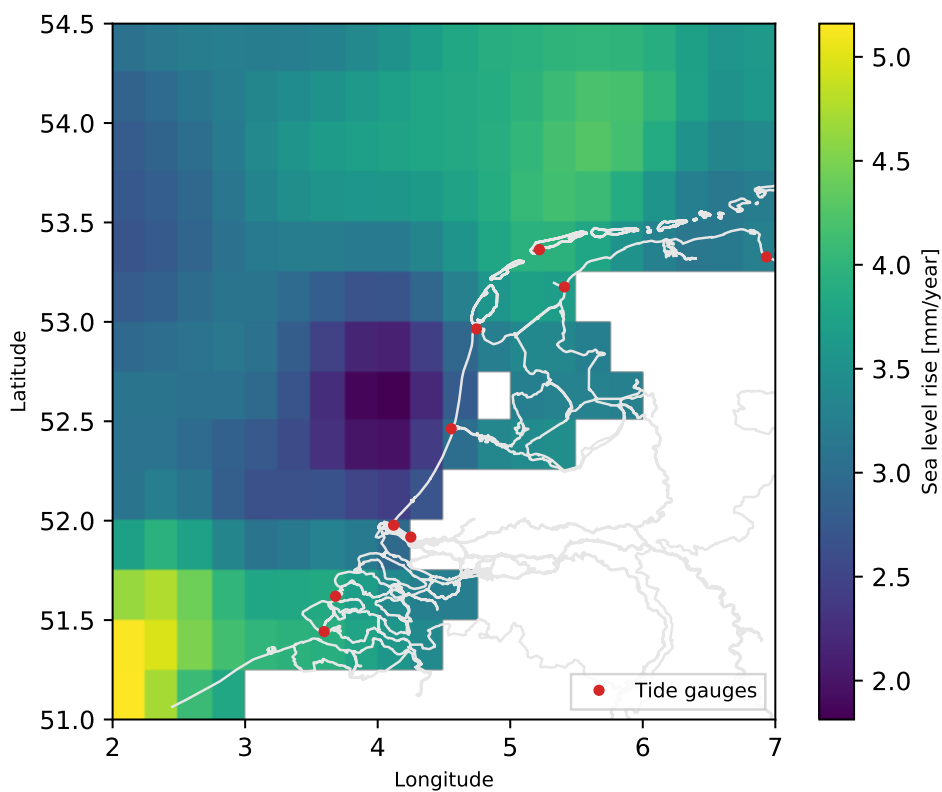
Samengevat kunnen we stellen dat over de 20ste eeuw, de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust aan de onderkant ligt van de globale schattingen. De zeespiegelstijging ligt over de periode 1993-2017 ook lager dan globaal. Op basis van de knik aanpak komen we op een absolute zeespiegelstijging van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

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

6.9 Vergelijking met satellietmetingen

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

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



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

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

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

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

6.10 Modelkeuzes en aannames

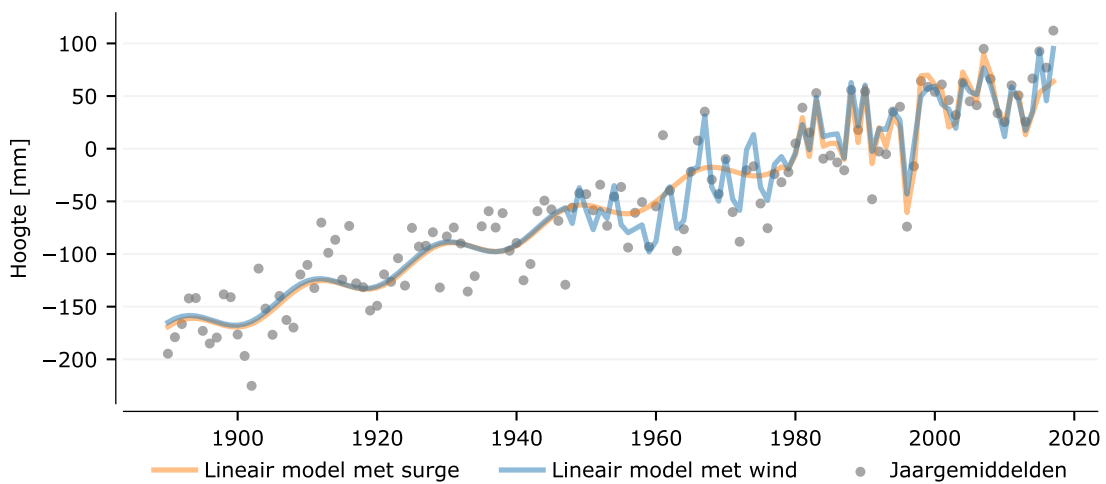
Omdat de zeespiegel van vorig jaar informatie bevat die gebruikt kan worden om een goede voorspelling te doen van de zeespiegel dit jaar wordt een autocorrelatie term toegevoegd.

De variantie van de residuen is afhankelijk van de verklarende variabelen (meer residu bij veel wind). Voor het herkennen van een trendbreuk is het belangrijk dat de trendparameter zo betrouwbaar mogelijk wordt geschat. De standaardfouten zijn daarom op robuuste wijze geschat via de zogenaamde Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent (HAC) estimator (Zeileis, 2004).

Zowel het toevoegen van de autocorrelatieterm als de correctie voor heteroskedasticiteit heeft geen effect op de schattingen van de huidige zeespiegel, alleen op de standaardfouten.

6.11 De volgende generatie: heranalyses voor wind en getij

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



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

7 Discussie

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

7.1 Versnelling

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

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

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

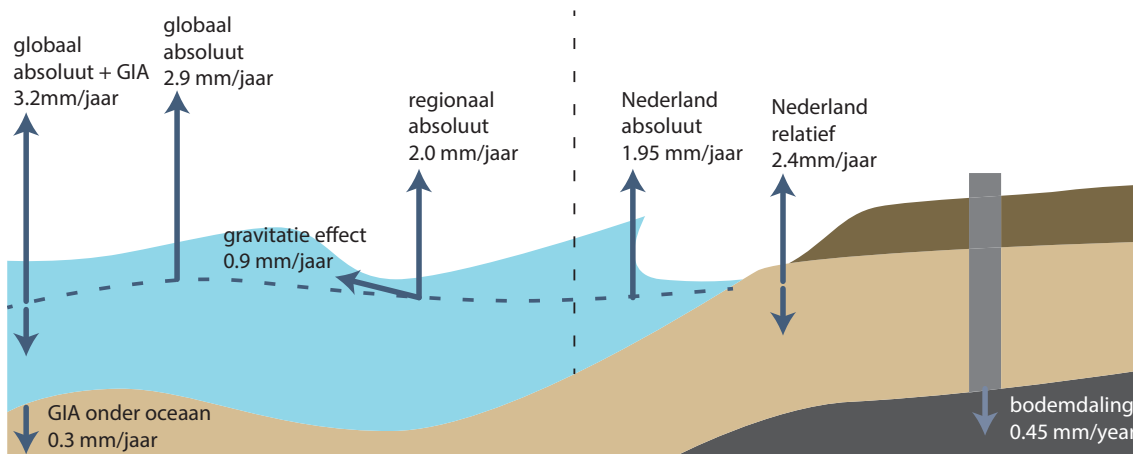
Hebben we niet te veel ruis? In sectie 6.3 hebben we gezien dat als er een noemenswaardige versnelling plaats vindt, dat we deze ook snel zullen zien. We zien deze ook snel omdat de gegevens van Nederlandse getijstations dagelijks worden ontsloten. Onderliggend is vaak de vraag of we een wereldwijde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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

7.2 Toepassing

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

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

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

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


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

7.3 Nederland onder zeespiegel

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

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

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

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

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

7.4 Hoe relatief willen we meten?

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

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

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

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

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

7.4.1 Verschillen binnen Nederland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8 Conclusie

8.1 Antwoorden

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

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

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

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

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

8.2 Aanbevelingen

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

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

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

de ontsluiting.

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

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

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

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

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

8.3 Vervolgonderzoek

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

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

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

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

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

9 Referenties

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