

Zeespiegelmonitor



Zeespiegelmonitor

ir.J.G. de Ronde	Deltares
dr.ir.F. Baart	Deltares
dr.C.A.Katsman	KNMI
ir.V.Vuik	HKV

1208712-000

Titel

Zeespiegelmonitor

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat, WVL

Project

1208712-000

Kenmerk

1208712-000-ZKS-0010

Pagina's

106

Trefwoorden

Zeespiegelstijging, peilmeetstations, satellietdata, regressie.

Samenvatting

Voor het Nederlandse beleid van kustveiligheid en kustlijnhandhaving is een betrouwbare en robuuste schatting van de zeespiegelstijging belangrijk. Het voorliggende rapport beschrijft verschillende exercities die zijn gedaan om de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust met een hogere betrouwbaarheid vast te stellen ten opzichte van eerdere studies, zoals bijvoorbeeld Deltares (2010). Hiervoor zijn zowel daggemiddelde als jaargemiddelde waterstanden gebruikt.

Er is onderzocht of de trend in de tijdreeks met waterstanden en de variantie van dit signaal kunnen worden verklaard aan de hand van diverse verklarende variabelen. De variabelen harmonisch getij, 18,6-jarige nodale getijcyclus, windsnelheid, windrichting, luchtdruk, en rivierafvoer zijn bij het onderzoek aan bod gekomen.

Als de zeespiegel op een tijdschaal van dagen wordt bekeken, zijn het harmonisch getij en de windsnelheid verantwoordelijk voor de grootste variatie van de waterstand. De variatie in de jaargemiddelde waterstanden wordt vooral veroorzaakt door zeespiegelstijging, gevolgd door wind en de 18,6-jarige nodale getijcyclus.

Het toevoegen van verklarende variabelen is zinvol gebleken, het reduceert de variantie, en vergemakkelijkt daardoor het herkennen van een eventuele versnelling van de zeespiegelstijging. Verschillende resultaten duiden op die versnelling van de zeespiegelstijging, maar op dit moment is dit nog niet met voldoende zekerheid vast te stellen.

Met behulp van satellietdata is geen betrouwbaardere maat voor de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust te verkrijgen dan met behulp van de getijdestations. De satellietdata kunnen wel als bevestiging gelden van hetgeen met de getijdestations gevonden is.

Het is belangrijk om de langst mogelijke reeks te gebruiken. Voor de Nederlandse kust is dit de periode 1890-2012. Om te voorkomen dat de berekende actuele zeespiegelstijging sterk afhankelijk is van de trends van vele decennia terug, kan gebruik worden gemaakt van lokale regressie met de LOESS methode. Deze methode geeft goed de ontwikkelingen weer in de recente periode, terwijl wel een consistente weergave (een vloeiende lijn zonder sprongen of knikken) van de gehele tijdsperiode verkregen wordt.

Dit rapport bevat een voorstel om de zeespiegelschattingen op basis van klimaatmodellen (KNMI) en op basis van analyse van meetgegevens (dit rapport) te combineren.

Om de resultaten makkelijk beschikbaar te maken is een web-applicatie ontwikkeld (sealevel in openearth) waar de in deze studie ontwikkelde methoden op een simpele manier toegepast kunnen worden op de gemeten zeespiegelstanden van de 6 verschillende hoofdpeilmeetstations langs de Nederlandse kust en op alle andere getijdestations over de wereld. Voor de Nederlandse stations kan gekozen worden met welke variabelen en met welke polynoom de zeespiegelstijging berekend en getoond wordt.

Titel
Zeespiegelmonitor

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat, WVL

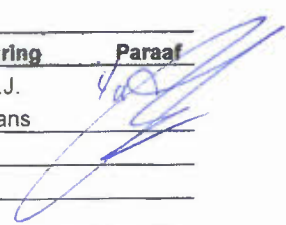
Project
1208712-000

Kenmerk
1208712-000-ZKS-0010

Pagina's
106

De zeespiegel is slechts een van de vele kust-indicatoren die goed geborgd moet zijn. Voorgesteld wordt om de gemaakte web-applicatie te combineren met een van de andere websites waar indicatoren beschikbaar worden gemaakt, bijvoorbeeld de Kustviewer. Zo kan een centraal en consistent portfolio van kustkengetallen gevormd worden.

De studie is gezamenlijk uitgevoerd door HKV, KNMI en Deltares. Door HKV (Vincent Vuik) zijn de analyses uitgevoerd op de data van de peilmeetstations, de analyse van de satellietdata is uitgevoerd door het KNMI (Caroline Katsman) en door Deltares (Fedor Baart) is de website ontwikkeld en is een methode aangegeven om waarnemingen en voorspellingen van zeespiegelstijging te combineren. De projectleiding lag bij Deltares (John de Ronde).

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
V4	jan. 2014	Ir. J.G. de Ronde		Prof.dr.ir. M. Kok		Drs. F.M.J. Hoozemans	
		Dr. F. Baart		Dr. J. Stronkhorst			
		Dr. C.A. Katsman					
		Ir. V. Vuik					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Context	1
1.2 Vraagstelling	1
1.3 Doelstelling	3
1.4 Leeswijzer	3
2 Huidige methode	5
2.1 Reproductie jaargemiddelden	5
2.2 Reproductie berekende zeespiegelstijgingsnelheden	6
2.2.1 Lineaire trend	6
2.2.2 Kwadratische trend	7
2.3 Update met metingen tot en met 2012	8
2.3.1 Lineaire trend	8
2.3.2 Kwadratische trend	9
2.4 Daggemiddelden versus jaargemiddelden	10
3 Fysische variabelen	13
3.1 Waterstand	13
3.2 Harmonisch getij	14
3.3 Nodale cyclus van de gemiddelde zeewaterstand	15
3.4 Luchtdruk	15
3.5 Wind	15
3.6 Noord-Atlantische oscillatie (NAO)	20
3.7 Rivieraafvoer	20
3.8 Watertemperatuur	21
3.9 Saliniteit	21
4 Modelopzet met daggemiddelden	23
4.1 Werkwijze	23
4.2 Correlaties	24
4.3 Selectie variabelen	26
4.3.1 Criteria	26
4.3.2 Verklaarde variantie	26
4.3.3 Regressiecoëfficiënten	29
4.3.4 Beta-gewichten	30
4.3.5 Akaike Informatiecriterium	31
4.3.6 Samenvatting en selectie van variabelen	32
4.4 Grafische weergave reproductie waterstanden	33
4.5 Controle residuen	35
4.5.1 Residuen als functie van de tijd	36
4.5.2 Homoscedasticiteit	36
4.5.3 Autoregressie	37
4.6 Lokale regressie	37
5 Modelopzet met jaargemiddelden	39
5.1 Werkwijze	39
5.2 Correlaties	40

5.3	Selectie variabelen	41
5.3.1	Criteria	41
5.3.2	Verklaarde variantie	41
5.3.3	Regressiecoëfficiënten	44
5.3.4	Beta-gewichten	45
5.3.5	Akaike Informatiecriterium	45
5.3.6	Samenvatting en selectie van variabelen	46
5.4	Grafische weergave reproductie waterstanden	48
5.4.1	Controle residuen	49
5.4.2	Homoscedasticiteit	50
5.4.3	Autoregressie	51
5.5	Lokale regressie	51
6	Vergelijking modellen	53
6.1	Daggemiddelden versus jaargemiddelden	53
6.1.1	Berekende zeespiegelstijging	53
6.1.2	Verklaarde variantie	54
6.1.3	Voordelen en nadelen	55
6.2	Verskil met oorspronkelijke methode	55
6.3	Eerste toepassing op lange tijdreeksen	57
7	Trends in zeespiegelstijging uit satelliet altimetrie voor het Noordzeegebied	61
7.1	Onderzoeksvraag	61
7.2	Gebruikte data	61
7.3	Resultaten	62
7.3.1	Gemiddelde trends	62
7.3.2	Altimetrie langs de kust	62
7.3.3	Vergelijking met getijdestations aan de kust	64
7.3.4	Gemiddelde trends zuidelijke Noordzee	65
7.4	Conclusies en aanbevelingen	68
7.5	Jaargemiddeld zeeniveau Noordzee	70
7.6	Zeeniveau bij getijdestations	72
8	Discussie, conclusies en aanbevelingen	75
8.1	Terugblik	75
8.2	Conclusies	75
8.3	Beantwoording van de door RWS gestelde vragen:	77
8.4	Discussie	77
8.5	Aanbevelingen	78
9	Referenties	81
 Bijlage(n)		
A	Combinatie van de zeespiegelschattingen van de procesmatige aanpak (KNMI) en de empirische aanpak	83
B	Jaargemiddelden Den Helder	85
C	Zeespiegelstijging 1890-2012	87

D Figuren o.b.v. daggemiddelden	91
E Figuren o.b.v. jaargemiddelden	99

1 Inleiding

1.1 Context

Binnen het huidige kustbeleid is de keuze gemaakt om het kustfundament mee te laten groeien met de zeespiegel door middel van zandsuppleties. Het benodigde suppletievolume in een bepaald jaar is dan gelijk aan de oppervlakte van het kustfundament, de Waddenzee en de Westerschelde tezamen (Figuur 1.1), vermenigvuldigd met de huidige zeespiegelstijging. Een correcte schatting van de actuele zeespiegelstijging is daarom belangrijk. Voor de veiligheid van de primaire waterkeringen is de verwachte zeespiegelstijging voor de komende decennia van belang. In het voorjaar van 2014 worden door het KNMI nieuwe voorspellingen voor de zeespiegelstijging geleverd. Koppeling van de opgetreden zeespiegelstijging met de voorspelde scenario's voor zeespiegelstijging is van belang om eenduidig vast te leggen welke curve als uitgangspunt voor het kustbeleid genomen moet worden. Hiermee wordt voorkomen dat er verschillende waarden voor zeespiegelstijging gehanteerd worden. Overal in dit rapport, behalve in H7 (satellietwaarnemingen), wordt de relatieve zeespiegel beschouwd, dus inclusief bodemdaling.



Figuur 1.1 Het kustfundament (donkerblauw), de Waddenzee (lichtblauw) en de Westerschelde (groen) vormen samen het zanddelend systeem van de Nederlandse kust.

1.2 Vraagstelling

Door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, DG Ruimte en Water, is de volgende centrale vraagstelling geformuleerd:

1. Wat is een goede maat voor de huidige zeespiegelstijging ten behoeve het suppletieprogramma / de suppletiebehoefte?
2. Wat is een nulpunt voor de voorspellingen van zeespiegelstijging ten behoeve van dijkversterkingen?

In de tweede vraag wordt een nulpunt gevraagd ten behoeve van dijkversterkingen. Voor het ontwerp van waterkeringen is een robuuste maat nodig voor de waterstandsverhoging die in het ontwerp moet worden meegenomen ten gevolge van de relatieve zeespiegelstijging over de levensduur van de te ontwerpen waterkering.

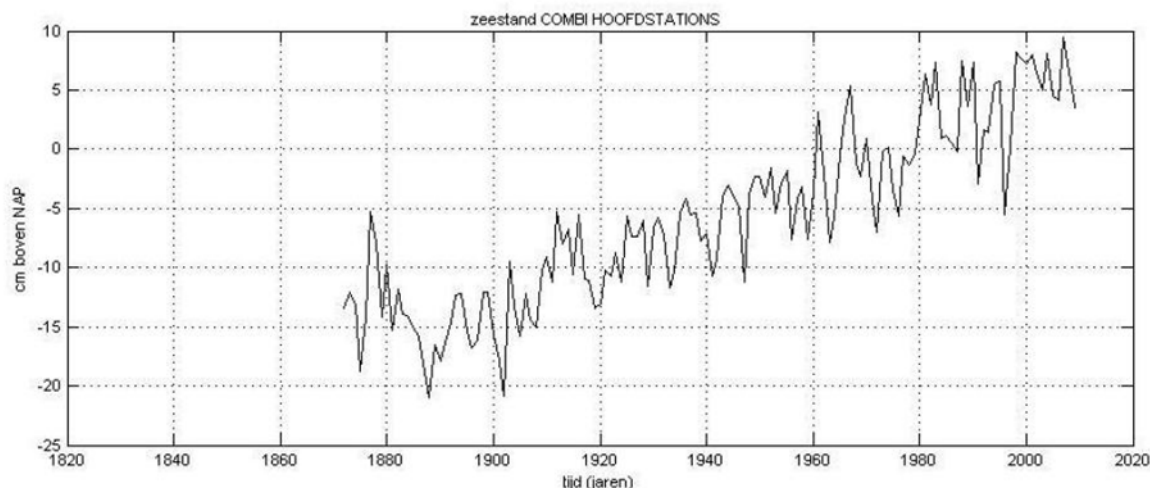
In deze rapportage is met name de eerste vraag uitgewerkt. In 2014 moet een goede maat worden gedefinieerd voor de actuele zeespiegelstijging, waarin eveneens de voorspellingen voor de zeespiegelstijging worden meegenomen. In 2014 dient het daarvoor benodigde onderzoek te worden uitgevoerd.

Probleemstelling

De huidige methode voor het bepalen van de actuele zeespiegelstijging, zoals beschreven in Deltares (2010), is lineaire extrapolatie van jaargemiddelde zeewaterstanden, met correcties voor wijzigingen in het NAP en voor de nodale getijcyclus van 18,6 jaar.

Extrapolatie van gemeten zeespiegelstijgingen langs de Nederlandse kust wordt voornamelijk bemoeilijkt door de grote variantie van het meetsignaal (Figuur 1.2). De variantie zorgt ervoor dat een robuuste schatting van de zeespiegelstijging alleen verkregen kan worden op basis van lange meetreeksen. Het gevolg is dat actuele waarden sterk afhankelijk zijn van de situatie van decennia terug, waardoor mogelijk recente verstoringen of versnellingen van de zeespiegelstijging nauwelijks invloed hebben op de berekende actuele stijgsnelheid (HKV, 2012).

De actuele stijgsnelheid wordt deels bepaald door langjarige schommelingen die los staan van de versnelling van de zeespiegelstijging door klimaatsverandering. De eerder gehanteerde methode (Deltares, 2010) geeft weinig inzicht in de langjarige schommelingen en de overige korte-termijn variantie in het meetsignaal. Het doel van de in deze rapportage ontwikkelde methode is om deze zaken te scheiden en om een robuuste schatting te geven van de huidige zeespiegelstijging, rekening houdend met eventuele recente veranderingen.



Figuur 1.2 Jaargemiddelde zeewaterstand, gemiddeld over de zes hoofdstations langs de Nederlandse kust (overgenomen uit Deltares, 2010).

De gebruikte methodiek en de uitkomsten moeten goed aansluiten bij de tweede vraag, zodat er in de toekomst een consistente waarde voor de zeespiegelstijging beschikbaar komt voor diverse toepassingen, zoals voor het toetsen en ontwerpen van waterkeringen.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is te komen tot een zeespiegelsignaal dat zo “puur” mogelijk is. Het gaat om het definiëren van een goede methode voor de berekening van de huidige zeespiegelstijging door de gegevens van de peilstations te combineren met andere databronnen die de trend in en de variantie rond het signaal helpen verklaren. Het verklaren van langjarige variaties zal worden onderzocht op basis van correlaties met fysische variabelen zoals windsnelheid, windrichting, luchtdruk, zeewatertemperatuur, saliniteit en rivierafvoer.

Ter beoordeling zal de nieuwe methodiek worden vergeleken met de huidige methode voor het bepalen van de zeespiegelstijging (Deltares, 2010), inclusief de meest recente gegevens.

De mogelijkheid wordt nagegaan om een geautomatiseerd model te ontwikkelen gebaseerd op de OpenEarth technieken. Hierdoor kan snel een nieuwe waarde voor de zeespiegelstijging bepaald worden en is de kennis over de methoden geborgd. Hierbij worden de resultaten gebruikt zoals verkregen in de hierboven genoemde onderdelen.

Aangegeven zal worden wat voor perspectieven ter verbetering er liggen voor de komende jaren. Hierbij wordt uitgegaan van een groeimodel.

1.4 Leeswijzer

In dit rapport is vooral aandacht besteed aan de tot nu toe opgetreden zeespiegelstijging en methoden om deze te beschrijven Hoofdstuk 2 t/m 7. Voor de koppeling van de opgetreden zeespiegelstijging met de voorspelde stijging door het KNMI is een methodiek voorgesteld in Hoofdstuk 8. In een vervolgstudie dient deze verder uitgewerkt te worden, samen met de toepassing ervan op de nieuwe voorspellingen die in het voorjaar 2014 gereed komen.

Beschrijving tot nu toe opgetreden zeespiegelstijging

Om consistent te zijn met het verleden, start hoofdstuk 2 met een reproductie van de resultaten van de huidige methode. Vervolgens worden modellen opgezet, waarin aanvullende fysische variabelen worden meegenomen, deze staan beschreven in hoofdstuk 3. De modellen zijn opgezet voor de periode 1970-2012 op basis van daggemiddelde (hoofdstuk 4) en jaargemiddelde (hoofdstuk 5) waterstanden en andere variabelen. In hoofdstuk 6 wordt een vergelijking gemaakt tussen de uitkomsten van de huidige methode (hoofdstuk 2) en de twee nieuwe modellen (hoofdstuk 4 en 5). Tevens wordt in hoofdstuk 6 de langere periode 1906-2012 geanalyseerd. In hoofdstuk 7 worden de satelliet metingen beschouwd over de periode 1993-2012. Het rapport eindigt met discussie, conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 8.

2 Huidige methode

Om consistent te zijn met het verleden, beschrijft dit hoofdstuk allereerst een reproductie van de resultaten van de huidige methode (Deltares, 2010). Vervolgens worden de getallen van een update voorzien door ook recente waterstandsmetingen (tot en met 2012) mee te nemen. Tenslotte wordt een vergelijking gemaakt tussen de berekende zeespiegelstijging op basis van jaargemiddelde (huidige methode) en daggemiddelde waterstanden.

2.1 Reproductie jaargemiddelden

In Deltares (2010) zijn jaargemiddelden gebruikt, die officieel zijn vastgesteld door Rijkswaterstaat. De jaargemiddelden zijn in de loop van de tijd op verschillende manieren bepaald, namelijk op basis van:

- Halftijstanden (gemiddelde van HW en LW) plus een correctie,
- 6-uurlijkse waterstanden,
- 3-uurlijkse waterstanden,
- 1-uurlijkse waterstanden,
- 10-minuten waterstanden (vanaf 1987).

De tijdreeksen met de laatste vier methoden van vastleggen worden door Rijkswaterstaat aangeduid als singuliere tijdreeksen. Daggemiddelde en jaargemiddelde waterstanden kunnen op basis van deze singuliere tijdreeksen bepaald worden door simpelweg het gemiddelde te berekenen. In Bijlage B wordt voor station Den Helder getoond hoe de in PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level, www.psmsl.org) opgenomen jaargemiddelden van Rijkswaterstaat zich verhouden tot de in dit rapport berekende jaargemiddelde waarde van de singuliere tijdreeksen.

Verschillen groter dan 3 mm zijn veelal gerelateerd aan het ontbreken van metingen in een gedeelte van het jaar. Vanaf 1971 (start met 1-uurlijkse waterstanden) is de reproductie tot op de millimeter gelijk aan de officieel vastgestelde jaargemiddelden, met uitzondering van 1993 en 2012, waar een afwijking van 1 mm zichtbaar is.

De NAP-correctie (vanaf 2005) is doorgevoerd in de Nederlandse tijdreeksen met NAP als referentieniveau. Om een homogene reeks te verkrijgen moet deze weer ongedaan gemaakt worden (Deltares, 2010). Voor de PSMSL tijdreeksen is dit al gebeurd. Hier is in de vergelijking rekening mee gehouden.

De conclusies zijn dat de twee databronnen (de PSMSL jaargemiddelden en de singuliere tijdreeksen van RWS) consistent zijn, en dat de reproductie van PSMSL jaargemiddelden op basis van de 1-uurlijkse en 10-minuten reeksen zeer nauwkeurig is.

2.2 Reproductie berekende zeespiegelstijgingsnelheden

In figuur 2.1 zijn de getallen uit Deltares (2010) gepresenteerd.

Tabel 3.1.3 Geschatte zeespiegelstijging in 2009 en het 95%-betrouwbaarheidsinterval op basis van de waarnemingen vanaf 1890 (op cm's afgeronde waarden).

Station	Regressie-model	zss 2009 [cm/eeuw]	2,5% [cm/eeuw]	97,5% [cm/eeuw]
Delfzijl	lineair	19	17	21
Harlingen	lineair	14	13	15
Den Helder	kwadratisch	20	16	23
Den Helder	lineair	14	13	15
IJmuiden	lineair	22	20	23
Hoek van Holland	lineair	24	23	25
Vlissingen	lineair	21	20	23
Gemiddelde 6 stations	lineair	19	17	20

Figuur 2.1 Zeespiegelstijging (cm/eeuw) en 95% betrouwbaarheidsinterval, zoals gepresenteerd in Deltares (2010).

De getallen uit Deltares (2010) zijn berekend op basis van een reeks met jaargemiddelde waterstanden met de volgende kenmerken:

- Periode 1890-2008,
- NAP-correctie ongedaan gemaakt,
- Nodale cyclus (met een periode van 18,6 jaar) aan de fit toegevoegd,
- Geen inverse barometer correctie toegepast.

2.2.1 Lineaire trend

Het lineaire model ziet er als volgt uit:

$$h(t) = A + Bt + D \sin(2\pi t / 18,613 + \phi). \quad (1)$$

De laatste term van het model representeert de nodale getijcyclus van 18,613 jaar. Geheel onafhankelijk van de oorspronkelijke berekeningen zijn de getallen opnieuw geproduceerd. Tabel 2.1 toont het resultaat van deze reproductie.

Station		Deltares (2010)			Reproductie		
		z.s.s.	2,5%	97,5%	z.s.s.	2,5%	97,5%
1	Delfzijl	19	17,1	21,2	19	17,1	21,2
2	Harlingen	14	12,4	15,5	13	10,6	14,6
3	Den Helder	14	12,6	14,6	15	13,1	16,7
4	Hoek van Holland	24	22,7	25,3	24	21,9	25,4
5	IJmuiden	22	19,6	23,6	22	19,6	23,6
6	Vlissingen	21	19,8	23,0	21	19,8	23,0
7	Gemiddelde	19	17,2	20,5	19	17,2	20,5

Tabel 2.1 Reproductie van zeespiegelstijging (cm/eeuw) en 95% betrouwbaarheidsinterval uit Deltares (2010).

Voor Harlingen, Den Helder en Hoek van Holland wijken de berekende getallen af van de in Deltares (2010) gepubliceerde waarden. Naslaan van de oorspronkelijke scripts maakt duidelijk dat alleen voor IJmuiden, Delfzijl en Vlissingen 1890 als startjaar werd gehanteerd. Voor de overige stations werd de gehele reeks gebruikt om de trends te bepalen. Op basis van visuele inspectie was bepaald dat alleen bij IJmuiden, Delfzijl en Vlissingen een discontinuïteit rond 1890 zichtbaar is in de reeks. Later in het project werd besloten om 1890 uniform door te voeren, maar de getallen zijn destijds blijkbaar niet ververst. De getallen in Deltares (2010) zijn dus niet consistent met de tekst van het rapport en de bijschriften van de tabellen.

2.2.2 Kwadratische trend

Het kwadratische model ziet er als volgt uit:

$$h(t) = A + Bt + Ct^2 + D \sin(2\pi t / 18,613 + \phi). \quad (2)$$

De laatste term van het model representeert de nodale getijcyclus van 18,613 jaar.

In Deltares (2010) is beargumenteerd dat bij Den Helder een statistisch significante versnelling (kwadratische term) aanwezig is in de data tussen 1890 en 2008. Tabel 2.2 toont het betrouwbaarheidsinterval voor de termen van een kwadratisch model bij toepassing op de data voor Den Helder voor de periode 1890-2008.

Station		lineaire term		kwadratische term	
		2,5%	97,5%	2,5%	97,5%
3	Den Helder	-3,95	0,40	-6,50E-05	1,05E-03

Tabel 2.2 95% betrouwbaarheidsinterval voor de parameters B (cm/jaar) en C (cm/jaar²) van een kwadratisch model voor Den Helder op basis van 1890-2008.

Het 95% betrouwbaarheidsinterval van Den Helder bevat waarden groter dan én kleiner dan nul. We definiëren als nulhypothese dat het toevoegen van de kwadratische term aan het model de kwaliteit van de fit niet verbetert. Een variantie-analyse (anova) voor het lineaire en het kwadratische model toont dat de kans 8% is, dat deze nulhypothese ten onrechte verworpen kan worden. Een gangbare vuistregel is dat deze kans kleiner dan 5% moet zijn, om de nulhypothese te verwerpen en in dit geval de kwadratische term statistisch significant te noemen.

Wanneer alle beschikbare jaargemiddelden van Den Helder worden gebruikt (1832-2008), bevat het betrouwbaarheidsinterval géén waarden kleiner dan nul, één van de redenen om in Deltares (2010) de kwadratische term een statistisch significante invloed toe te schrijven. De kans dat de nulhypothese verworpen kan worden, is in dat geval 99,3%. Ook dit bevestigt de statistische significantie van de kwadratische term van het model voor de periode 1832-2008.

Tabel 2.3 toont het betrouwbaarheidsinterval voor de termen van een kwadratisch model bij toepassing op de data voor Den Helder voor de periode 1832-2008.

Station		lineaire term		kwadratische term	
		2,5%	97,5%	2,5%	97,5%
3	Den Helder	-1,76	-0,16	7,72E-05	4,92E-04

Tabel 2.3 95% betrouwbaarheidsinterval voor de parameters B (cm/jaar) en C (cm/jaar²) van een kwadratisch model voor Den Helder op basis van 1832-2008.

Conclusie: de kwadratische term is alleen statistisch significant, wanneer ook jaargemiddelden van vóór 1890 worden betrokken. De getallen in Deltares (2010) zijn ook hier niet consistent met de tekst van het rapport. De tekst suggereert dat de analyse betrekking heeft op 1890-2008, terwijl de getallen berekend zijn op basis van 1832-2008.

Bij station Vlissingen is een statistisch significante vertraging van de zeespiegelstijging zichtbaar voor de periode 1890-2008. Dit gegeven is niet gerapporteerd in Deltares (2010).

2.3 Update met metingen tot en met 2012

De getallen uit Tabel 2.1 (kolom 'reproductie') zijn gebaseerd op de data van 1890-2008. Inmiddels kan de analyseperiode worden uitgebreid met de jaargemiddelden tot en met 2012. Deze paragraaf toont de berekende trends over deze periode. Daarnaast wordt getoetst of het toevoegen van een kwadratische term aan het model voor de periode 1890-2012 tot een statistisch significante verbetering van het model leidt.

2.3.1 Lineaire trend

Het gebruikte lineaire model is weergegeven in vergelijking (1). Tabel 2.4 toont de berekende zeespiegelstijging inclusief het bijbehorende 95% betrouwbaarheidsinterval voor de analyseperiodes 1890-2008 en 1890-2012.

Station		1890-2008			1890-2012		
		z.s.s.	2,5%	97,5%	z.s.s.	2,5%	97,5%
1	Delfzijl	19,1	17,1	21,2	19,1	17,2	21,0
2	Harlingen	12,6	10,6	14,6	12,7	10,9	14,6
3	Den Helder	14,9	13,1	16,7	14,9	13,3	16,5
4	Hoek van Holland	23,6	21,9	25,4	23,6	22,0	25,2
5	IJmuiden	21,6	19,6	23,6	21,3	19,5	23,1
6	Vlissingen	21,4	19,8	23,0	21,4	19,9	22,8
7	Gemiddelde	18,8	17,3	20,4	18,8	17,4	20,3

Tabel 2.4 De berekende zeespiegelstijging (cm/eeuw) inclusief het bijbehorende 95% betrouwbaarheidsinterval bij analyseperiodes van 1890-2008 en 1890-2012.

Bijlage C bevat de bijbehorende figuren met waterstanden en regressielijnen. De verschillen in berekende zeespiegelstijging zijn zeer klein. Alleen bij IJmuiden komt deze waarde 0,3 cm/eeuw lager uit na toevoeging van de data voor 2009-2012. De figuur voor IJmuiden uit

Bijlage C laat zien dat de jaargemiddelde waterstanden bij dit station in de jaren 2009-2012 inderdaad relatief laag liggen, en de berekende trend omlaag trekken.

2.3.2 Kwadratische trend

Het gebruikte kwadratische model is weergegeven in vergelijking (2). Tabel 2.5 en Tabel 2.6 tonen voor de perioden 1890-2008 en 1890-2012 de waarden en 95% betrouwbaarheidsintervallen voor de regressiecoëfficiënten B en C, behorend bij de lineaire en kwadratische term van het model.

We definiëren opnieuw als nulhypothese dat het toevoegen van de kwadratische term aan het model de kwaliteit van de fit niet verbetert. Een variantie-analyse (anova) voor het lineaire en het kwadratische model levert de kans dat deze nulhypothese ten onrechte verworpen kan worden. Deze kans is opgenomen in de laatste kolom van de onderstaande tabellen. Een gangbare vuistregel is dat deze kans kleiner dan 5% moet zijn, om een term statistisch significant te noemen. Een andere toets op significantie is of de waarden in het 95% betrouwbaarheidsinterval eenduidig positief (versnelling) ofwel negatief (vertraging) zijn.

Station		lineaire term			kwadratische term			P(>t) kwa
		B	2,5%	97,5%	C	2,5%	97,5%	
1	Delfzijl	-0,63	-3,21	1,95	2,1E-04	-4,5E-04	8,7E-04	53%
2	Harlingen	-0,16	-2,66	2,34	7,3E-05	-5,7E-04	7,1E-04	82%
3	Den Helder	-1,77	-3,95	0,40	4,9E-04	-6,5E-05	1,1E-03	8%
4	Hoek van Holland	-0,22	-2,45	2,01	1,2E-04	-4,5E-04	6,9E-04	68%
5	IJmuiden	0,12	-2,30	2,54	2,4E-05	-6,0E-04	6,5E-04	94%
6	Vlissingen	2,41	0,45	4,37	-5,6E-04	-1,1E-03	-6,1E-05	3%
7	Gemiddelde	-0,04	-2,06	1,97	5,9E-05	-4,6E-04	5,8E-04	82%

Tabel 2.5 Regressiecoëfficiënten B (cm/jaar) en C (cm/jaar²) van de lineaire en kwadratische term van het kwadratische model voor de periode **1890-2008**, inclusief 95% betrouwbaarheidsinterval en toets op statistische significantie van de kwadratische term.

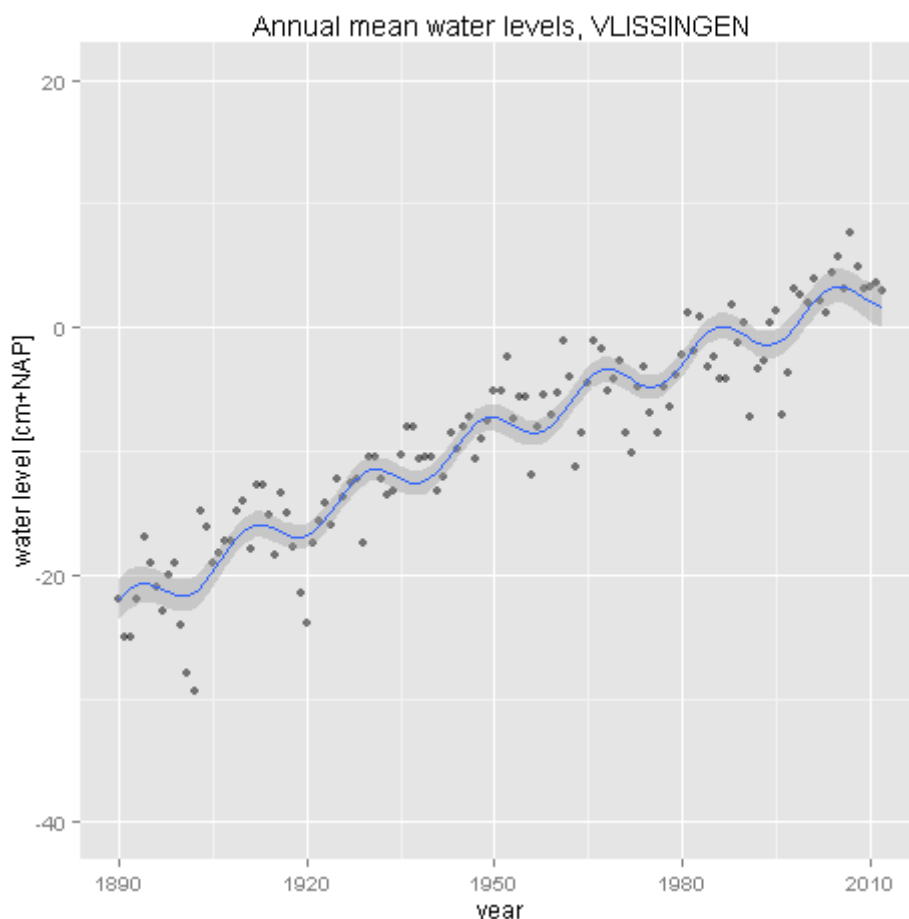
Station		lineaire term			kwadratische term			P(>t) kwa
		B	2,5%	97,5%	C	2,5%	97,5%	
1	Delfzijl	-0,49	-2,84	1,86	1,7E-04	-4,3E-04	7,8E-04	57%
2	Harlingen	-0,38	-2,66	1,90	1,3E-04	-4,5E-04	7,1E-04	66%
3	Den Helder	-1,57	-3,54	0,41	4,4E-04	-6,8E-05	9,5E-04	9%
4	Hoek van Holland	-0,17	-2,19	1,84	1,0E-04	-4,1E-04	6,2E-04	69%
5	IJmuiden	0,51	-1,69	2,71	-7,5E-05	-6,4E-04	4,9E-04	79%
6	Vlissingen	2,01	0,23	3,79	-4,6E-04	-9,2E-04	-3,1E-06	5%
7	Gemiddelde	-0,02	-1,85	1,81	5,2E-05	-4,2E-04	5,2E-04	83%

Tabel 2.6 Regressiecoëfficiënten B (cm/jaar) en C (cm/jaar²) van de lineaire en kwadratische term van het kwadratische model voor de periode **1890-2012**, inclusief 95% betrouwbaarheidsinterval en toets op statistische significantie van de kwadratische term.

Voor beide perioden geldt dat de kwadratische term alleen bij Vlissingen significant is. Hier treedt een vertraging van de zeespiegelstijging op. Bij alle andere stations is de kwadratische term niet significant. Voor beide perioden is de kans op verwerping van de nulhypothese

namelijk groter dan 5%, en kent het 95% betrouwbaarheidsinterval van de kwadratische term zowel waarden kleiner dan nul als groter dan nul.

Figuur 2.2 toont de kwadratische fit met nodale cyclus door de data van Vlissingen. Omdat deze afname zich alleen voor het station Vlissingen voordoet wordt hier verder geen aandacht aan geschonken.



Figuur 2.2 Jaargemiddelde waterstanden bij Vlissingen voor de periode 1890-2012, inclusief kwadratische trend en nodale cyclus.

2.4 Daggemiddelden versus jaargemiddelden

In de huidige aanpak worden waterstanden eerst per jaar gemiddeld, en wordt er vervolgens een model toegepast. In het vervolg van dit onderzoek zullen ook daggemiddelde waterstanden worden gebruikt. Alvorens dit te doen, is het goed om te onderzoeken of een model op basis van daggemiddelden tot andere waarden voor de zeespiegelstijging leidt dan een model op basis van jaargemiddelden.

Om een consistente aanpak te garanderen, zijn zowel daggemiddelde als jaargemiddelde waterstanden bepaald door middeling van de singuliere waterstandstijdreeksen (zie paragraaf 3.1). Tabel 2.7 toont de berekende zeespiegelstijging met bijbehorend 95% betrouwbaarheidsinterval op basis van jaargemiddelde en daggemiddelde waterstanden.

Jaren met minder dan 355 dagen met waterstandsdata zijn buiten beschouwing gelaten in de vergelijking. Hierdoor vallen bij diverse stations tot en met de eerste helft van de twintigste eeuw diverse jaren af. De beginjaren voor de vergelijking (Tabel 2.7) zijn zodanig gekozen, dat er geen ontbrekende waarden in de reeks met jaargemiddelden voorkomen.

Station		Analyseperiode		Jaargemiddelden			Daggemiddelden		
		begin	eind	z.s.s.	2,5%	97,5%	z.s.s.	2,5%	97,5%
1	Delfzijl	1879	2012	18,9	17,2	20,5	18,9	18,3	19,6
2	Harlingen	1939	2012	16,5	12,1	20,8	16,7	15,1	18,4
3	Den Helder	1943	2012	17,3	13,0	21,5	17,6	16,1	19,1
4	Hoek van Holland	1948	2012	18,2	13,6	22,9	18,6	17,0	20,2
5	IJmuiden	1948	2012	27,0	22,5	31,6	27,3	25,9	28,8
6	Vlissingen	1911	2012	20,2	18,3	22,1	20,3	19,6	21,1

Tabel 2.7 Berekende zeespiegelstijging (z.s.s.) in cm/eeuw met bijbehorend 95% betrouwbaarheidsinterval op basis van jaargemiddelde en daggemiddelde waterstanden.

Uit de getallen blijkt dat de verschillen in berekende zeespiegelstijging variëren tussen 0 en 0,4 cm/eeuw. Opvallend is dat de verschillen het kleinst zijn bij de langste meetreeksen (Delfzijl en Vlissingen). De betrouwbaarheidsintervallen bij daggemiddelde waterstanden zijn kleiner, maar dit is puur het gevolg van het meenemen van meer data. De grootte van het betrouwbaarheidsinterval is namelijk afhankelijk van de wortel van het aantal observaties.

De amplitude en fase van de nodale cyclus uit vergelijking (1) vertonen grote overeenkomst bij berekening op basis van daggemiddelden of jaargemiddelden.

3 Fysische variabelen

In dit hoofdstuk komen diverse fysische variabelen aan de orde, die mogelijk kunnen dienen als verklarende variabelen voor de zeespiegelstijging en/of de variantie van het meetsignaal. In latere hoofdstukken zal de afweging gemaakt worden wat het toevoegen van deze variabelen doet met de kwaliteit van het model.

3.1 Waterstand

Er is gebruik gemaakt van de waterstandsmetingen bij de getijdestations Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Beschouwde getijdestations (witte tekst) en meteorologisch station De Kooy (gele tekst) langs de Nederlandse kust.

Alle waterstanden vanaf 2005 zijn verhoogd, om de NAP-correctie ongedaan te maken, waardoor een homogene reeks ontstaat.

De officieel door Rijkswaterstaat vastgestelde jaargemiddelden zijn op verschillende manieren

bepaald:

1. Halftijstanden plus een correctie,
2. 3-uurlijkse waterstanden,
3. 1-uurlijkse waterstanden en
4. 10-minuten waterstanden (vanaf 1987).

De tijdreeksen met de laatste drie methoden van vastleggen worden door Rijkswaterstaat aangeduid als singuliere tijdreeksen. Daggemiddelde en jaargemiddelde waterstanden kunnen op basis van deze tijdreeksen bepaald worden door simpelweg het gemiddelde te berekenen. Tabel 3.1 toont de jaren waarvoor waterstandsdata beschikbaar is in de vorm van respectievelijk jaargemiddelden en singuliere tijdreeksen. De data voor station IJmuiden bestaat uit een samenvoeging van de data van station IJmuiden Noordersluis (t/m 1980) en IJmuiden Buitenhaven (vanaf 1981).

Station	Jaar-gemiddelden	Singuliere tijdreeksen
Delfzijl	1865	1879
Harlingen	1865	1935
Den Helder	1865	1932
IJmuiden	1871	1924
Hoek van Holland	1864	1900
Vlissingen	1862	1863

Tabel 3.1 Per station het startjaar van de jaargemiddelden volgens PSMSL en het startjaar van het vastleggen van waterstanden in singuliere tijdreeksen.

De singuliere tijdreeksen zijn beschikbaar in de applicatie Waterbase van Rijkswaterstaat. Op de OpenDAP-server is een versie van deze data in netCDF-formaat aanwezig. Deze netCDF-files zijn gebruikt in het huidige project.

De jaargemiddelden zijn gedownload van de website van de PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level, <http://www.psmsl.org/data/obtaining/>). Bij Rijkswaterstaat zijn voor enkele van deze stations ook nog jaargemiddelden voor eerdere jaren beschikbaar.

3.2 Harmonisch getij

Omdat de getijcyclus 24 uur 50 minuten is geeft dit in daggemiddelde zeespiegelwaarden een extra verstoring (slingering) die problemen kan geven. Dit kan voorkomen worden door het astronomische getij mee te nemen. Er zijn meerdere databronnen beschikbaar voor het harmonisch getij. De data zoals beschikbaar bij Rijkswaterstaat zijn het resultaat van een harmonische analyse van tijdreeksen. De gemiddelde waterstand in deze tijdreeksen stijgt door de optredende zeespiegelstijging. Aangezien het niet wenselijk is om een gecombineerd signaal met harmonisch getij en zeespiegelstijging in het model op te nemen, is gekozen voor een andere methode. Het betreft de uitgebreid gevalideerde T_Tide Harmonic Analysis Toolbox (Pawlowicz et al. 2002) met de onderliggende xtide database (Flater, 1996). De harmonische constituenten in de xtide database zijn eenmalig bepaald, en worden vervolgens gebruikt om de gehele tijdreeks te genereren. De Toolbox kan in de huidige vorm data genereren vanaf 1970. Na aanpassing van de Toolbox kunnen data gegenereerd worden over elke gewenste periode. In de huidige opdracht was daar geen mogelijkheid toe.

3.3 Nodale cyclus van de gemiddelde zeewaterstand

De 18,6-jarige nodale cyclus in de gemiddelde zeewaterstand wordt niet opgegeven, maar wordt berekend door een harmonische component aan het door de data te fitten model toe te voegen.

De nodale cyclus N wordt beschreven met de volgende uitdrukking als functie van de tijd t :

$$N = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T_N} + \phi\right), \quad (1)$$

waarin A een onbekende amplitude, ϕ een onbekende fase en T_N de vooraf bekende periode van 18,613 jaar is. Vergelijking (1) kan worden herschreven tot:

$$N = A \cos(\phi) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + A \sin(\phi) \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) = C \sin\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + D \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right). \quad (2)$$

De coëfficiënten C en D dienen te volgen uit een regressie-analyse. Met de coëfficiënten C en D kunnen vervolgens de amplitude A en fase ϕ worden berekend via:

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{C^2 + D^2} \\ \phi &= \arctan(D/C) \end{aligned} \quad (3)$$

3.4 Luchtdruk

Aangenomen is dat er een lineaire relatie bestaat tussen de luchtdruk en de gemeten waterstand. Deze aanname is in overeenstemming met de theoretische formuleringen voor de inverse barometercorrectie:

$$\Delta h = -0,995(p - \bar{p}), \quad (4)$$

waarin Δh het waterstandsverschil in cm, p de lokale luchtdruk in hPa, en $\bar{p}$ de (wereldwijd) gemiddelde luchtdruk is.

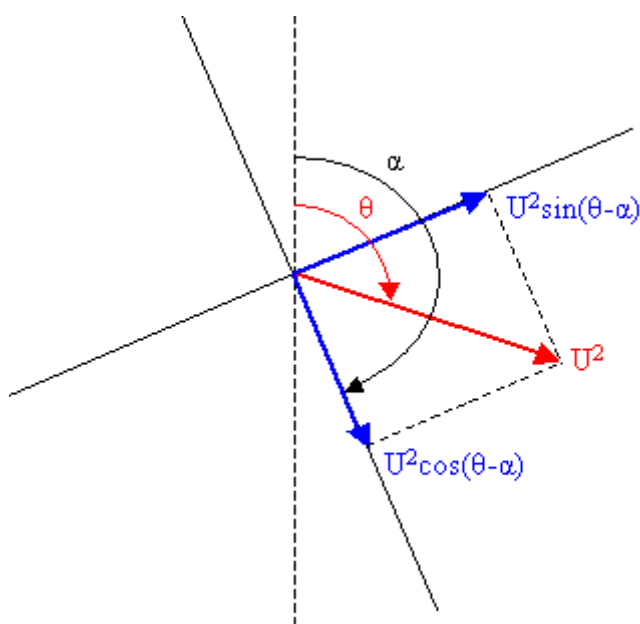
Er is gebruik gemaakt van meetgegevens van het KNMI voor meetstation De Kooy (station ID 235, Figuur 3.), in de kop van Noord-Holland. Er zijn dagwaarden beschikbaar vanaf 1906. De gebruikte variabele is de luchtdruk, herleid tot zeeniveau. In deze studie is dit KNMI station wordt voor de gehele Nederlandse gehanteerd.

3.5 Wind

De windschuifspanning op het wateroppervlak (en daarmee de resulterende waterstandsopzet) is afhankelijk van de windsnelheid in het kwadraat. Het effect van wind W wordt daarom beschreven met de volgende uitdrukking als functie van de kwadratische windsnelheid U^2 en de windrichting θ (in graden):

$$W = A \cdot U^2 \cos\left(\frac{\pi}{180}(\theta - \alpha)\right) + B \cdot U^2 \sin\left(\frac{\pi}{180}(\theta - \alpha)\right). \quad (5)$$

Het idee is dat de vector met lengte U^2 en richting θ wordt ontbonden in een richting α waarbij de grootste opzet optreedt (de cos term) en een richting haaks daarop (de sin term). Hoeken zijn gedefinieerd als de richting van de vector ('wind to direction') in graden ten opzichte van Noord (nautische conventie). Dit principe is geïllustreerd in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Ontbinding van de vector met grootte U^2 en richting θ in twee componenten.

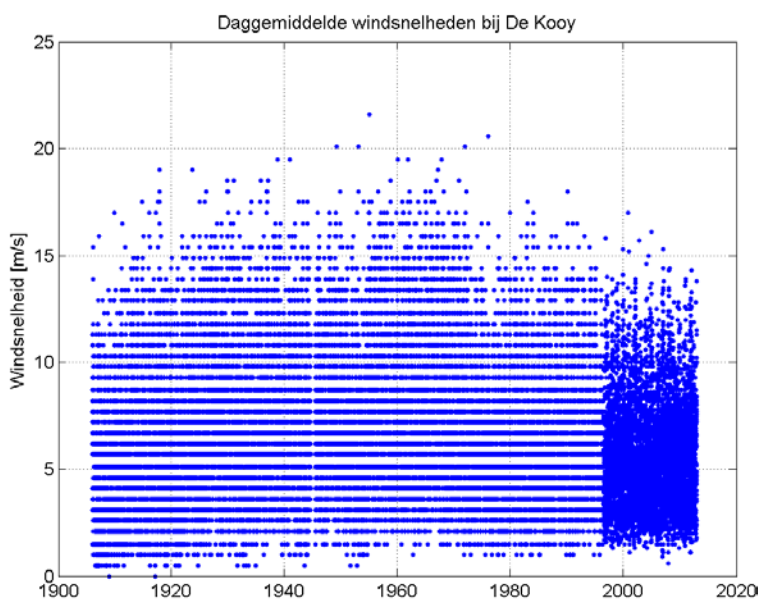
De richting α is per station bepaald door met een regressie-analyse te onderzoeken bij welke waarde de regressiecoëfficiënt voor de cos-term maximaal is. De gevonden waarden komen bijna overeen met een richting loodrecht op de kust.

Voor wind is (evenals voor de luchtdruk) gebruik gemaakt van meetgegevens van het KNMI voor meetstation De Kooy (station ID 235), in de kop van Noord-Holland, zie Figuur 3.1. Er zijn dagwaarden beschikbaar vanaf 1906. De gebruikte gegevens zijn de etmaalgemiddelde windrichting en windsnelheid.

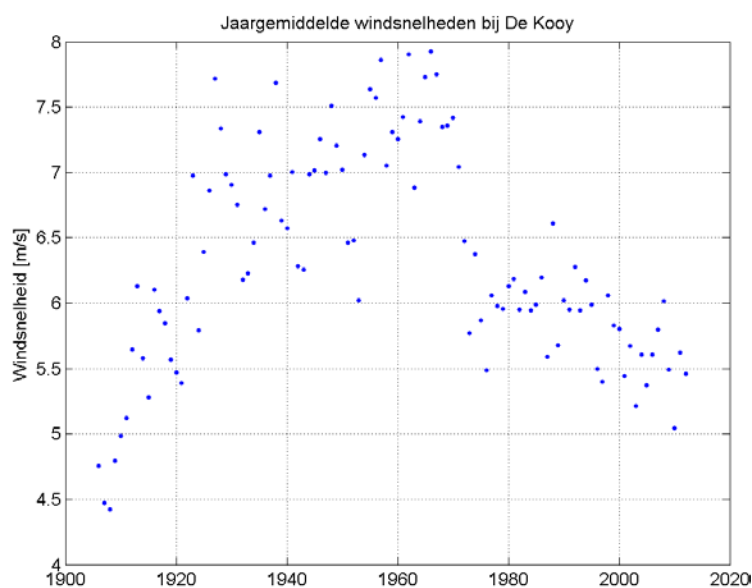


Figuur 3.3 Station De Kooy (www.knmi.nl).

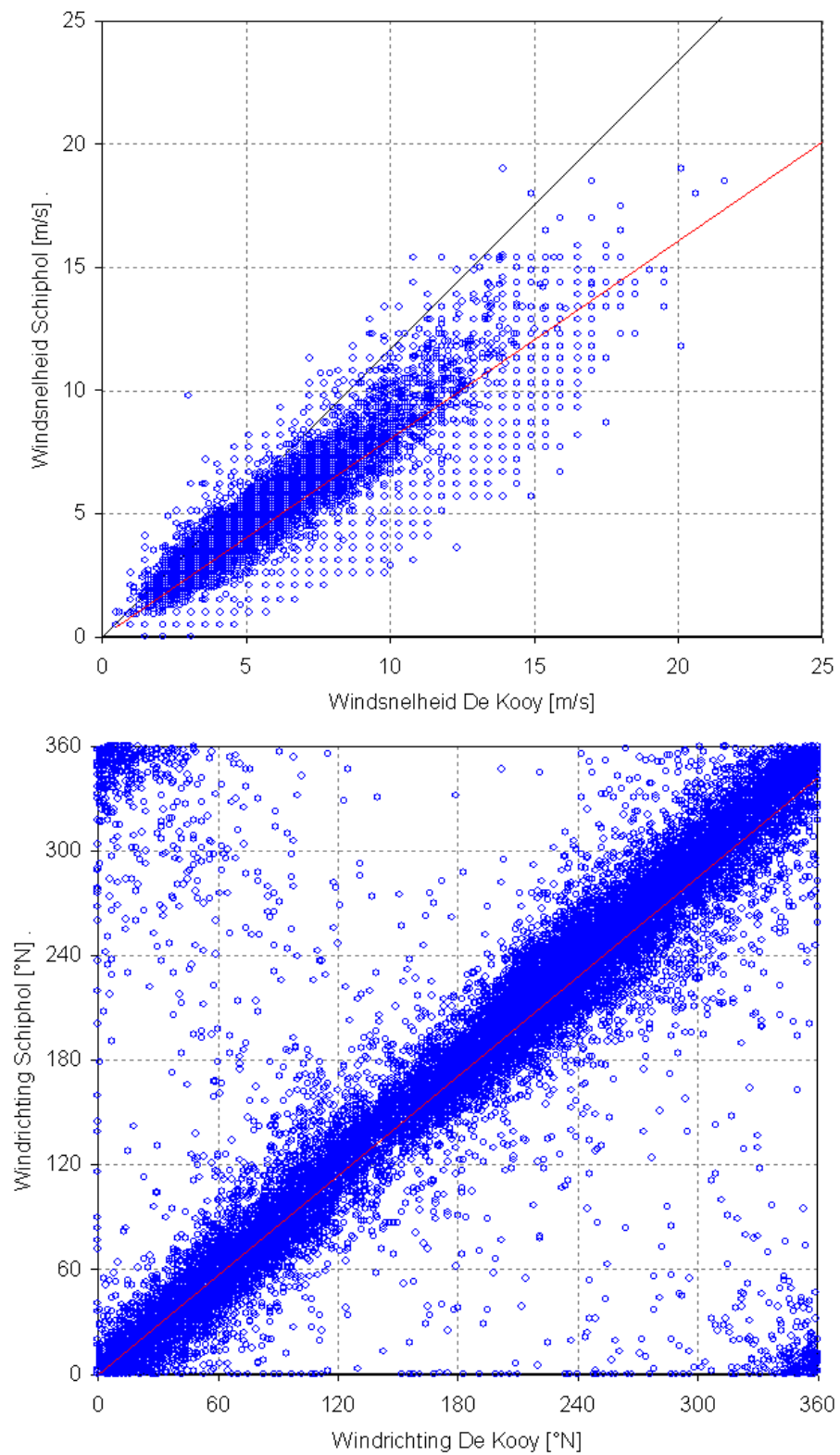
Figuur 3.4 toont de tijdreeks met windsnelheden bij De Kooy. Figuur 3.5 toont dezelfde tijdreeks, maar hierin zijn de windsnelheden per jaar gemiddeld. Opvallend is dat de windsnelheden toe zijn genomen in de periode tot ongeveer 1960, en dat sindsdien de windsnelheden weer een afnemende trend vertonen. In Figuur 3.6 worden de windsnelheid en windrichting bij De Kooy vergeleken met de overeenkomstige waarden bij Schiphol. Data bij Schiphol is beschikbaar vanaf 1951. De windrichting bij beide stations komt gemiddeld genomen sterk overeen. De snelheid bij De Kooy is overwegend hoger dan bij Schiphol. Dit is verklaarbaar, gezien de ligging van De Kooy bij de kust. Voor deze studie is dat niet van belang. Verdere analyse van de winddata en de homogeniteit ervan is echter urgent voor de periode voor 1951, dit moet in de volgende fase opgepakt worden.



Figuur 3.4 Windsnelheid station De Kooy



Figuur 3.5 Gemiddelde windsnelheid De Kooy

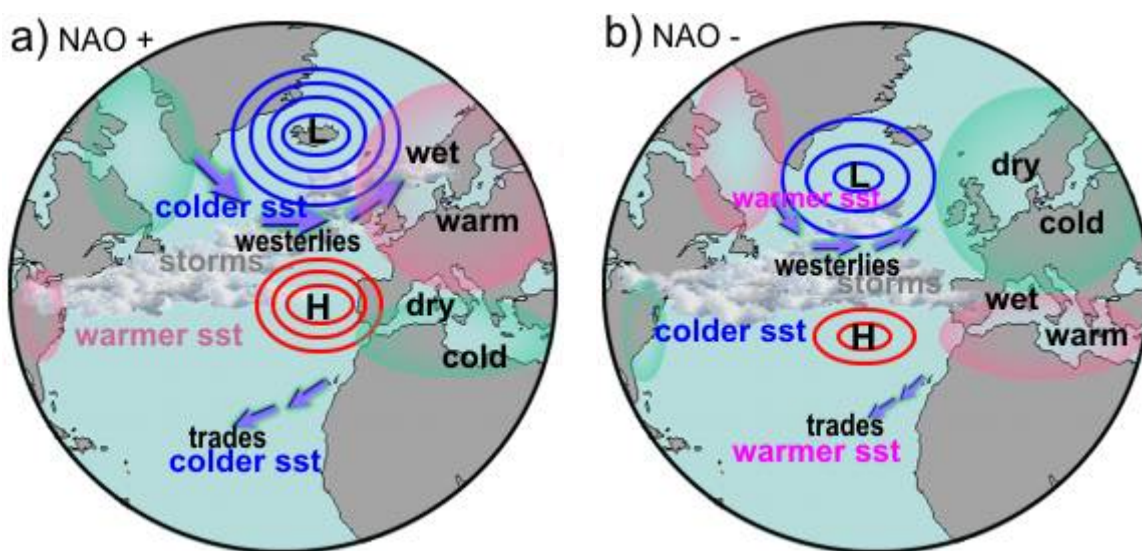


Figuur 3.6 Vergelijking tussen windsnelheid (boven) en windrichting (onder) bij De Kooy en Schiphol.

3.6 Noord-Atlantische oscillatie (NAO)

De Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) is een maatstaf voor het verschil in luchtdruk tussen het hogedrukgebied bij de Azoren en het lagedrukgebied bij IJsland. Deze NAO is voornamelijk in de wintermaanden een goede indicator voor het weer in Europa.

Bij een hoge NAO is de IJslanddepressie relatief diep en/of het Azorenhoog relatief sterk. Dit leidt tot een sterke straalstroom, een van west naar oost gerichte luchtstroming op ongeveer tien kilometer hoogte. Het gevolg is dat in Noord-Europa veel wind, buien en relatief hoge temperaturen optreden. Bij een lage NAO krijgt vooral Zuid-Europa te maken met regen en wind, en is het droog en koud in Noord-Europa. Zie Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Schematische weergave van het effect van de NAO (uit Bojariu en Gimeno, 2003).

Bij een hoge NAO is de luchtdruk in de Noord-Atlantische oceaan relatief laag, waardoor de waterstand in dit gebied relatief hoog is (zie paragraaf 3.4). Daarnaast is er bij een hoge NAO sprake van relatief sterke westenwind, waardoor de waterstand aan de Nederlandse kust wordt opgestuwd. Er is dus al met al een positieve correlatie te verwachten tussen de NAO en de waterstand aan de Nederlandse kust.

De data voor de NAO-index is afkomstig van de Climate Data Guide van NCAR/UCAR¹. De reeks bevat maandwaarden, en begint in 1865.

3.7 Rivierafvoer

Bij hoge rivierafvoeren kan nabij de riviermonding een verhoging van de waterstand gevonden worden. Dit effect kan naar verwachting vooral bij Hoek van Holland een rol spelen. Het getijdestation ligt daar niet direct aan de kust, maar (gemeten vanaf de kop van de havendam) ongeveer 5 km stroomopwaarts op de Nieuwe Waterweg. Aangenomen is dat er een lineaire relatie bestaat tussen de rivierafvoer bij Lobith en de gemeten waterstanden langs de Nederlandse kust (en daarmee de waterstandsopzet). Een fasevertraging van 2 dagen is toegepast vanwege de afstand tussen Lobith en de zee.

¹ https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/climate_index_files/nao_station_monthly.txt

Voor rivierafvoer is gebruik gemaakt van een reeks met dagwaarden, opgeleverd door RWS. Deze reeks begint in 1901².

3.8 Watertemperatuur

Water heeft een lagere dichtheid bij een hogere temperatuur. Opwarming van het water leidt daarom tot een toename van de waterstand. Dit verschijnsel staat bekend als thermische expansie.

De dichtheid van water is maximaal bij ongeveer 4 °C. De temperatuur in de Noordzee is gemiddeld minimaal ongeveer 5 °C in februari, en maximaal 17 °C in augustus. Bij deze toename zou de waterstand in het geval van een gesloten systeem met ongeveer 1,2 mm per meter diepte stijgen. De diepte van de zuidelijke Noordzee varieert tussen de 20 en 30 m. Dit zou betekenen dat de waterstand zo'n 2 tot 4 cm zou verschillen tussen zomer en winter. In werkelijkheid pakt dit verschil veel lager uit. De temperatuurflictuaties verlopen zeer langzaam, waardoor het water alle gelegenheid krijgt zich te herverdelen tussen de Noordzee en de Atlantische oceaan.

We hebben besloten om de watertemperatuur vooralsnog niet mee te nemen in het model. Dit om de volgende redenen, waarvan de eerste de voornaamste reden is:

1. De watertemperatuur van de Noordzee is de afgelopen decennia gestaag toegenomen. Wanneer een relatie gezocht moet worden tussen een stijgende zeespiegel en een stijgende watertemperatuur, is het onmogelijk om te bepalen welk deel van de zeespiegelstijging wordt veroorzaakt door de stijgende watertemperatuur in de Noordzee³.
2. Watertemperatuur wordt vaak aan het wateroppervlak gemeten. Dit is geen goede maat voor de thermische expansie van het zeewater.
3. Er zijn geen langjarige reeksen beschikbaar die een goede indicatie geven van de gemiddelde temperatuur van de Noordzee.
4. We ontwikkelen geen model dat de wereldwijde zeespiegelstijging dient te verklaren. Het toevoegen van de oceaantemperatuur aan het model is dan ook geen optie.

3.9 Saliniteit

Saliniteit zou meegenomen kunnen worden in het model, omdat dit een maat is voor de invloed van uitstromend zoet water op de waterstand. Besloten is om het effect van uitstromend zoet water mee te nemen door middel van de rivierafvoer, en niet indirect door middel van de saliniteit.

² Via de applicatie Waterbase (en daarom ook via de OpenDAP server van Deltares) is alleen een tijdreeks beschikbaar die begint in 1989.

³ Dit verschijnsel staat bekend als 'confounding': de variabele 'watertemperatuur' correleert zowel met de onafhankelijke variabele 'tijd' als met de afhankelijke variabele 'waterstand'.

4 Modelopzet met daggemiddelden

Dit hoofdstuk beschrijft de opzet en de resultaten van een model, dat de waterstand beschrijft aan de hand van de variabelen zoals beschreven in het hoofdstuk 3, plus de onafhankelijke variabele tijd. De relatie tussen tijd en waterstand is de zeespiegelstijging waar we naar op zoek gaan. Het model dat beschreven wordt in dit hoofdstuk maakt gebruik van daggemiddelde waarden van alle variabelen. Hoofdstuk 5 kent een zelfde inhoud, maar beschrijft een model dat gebruik maakt van jaargemiddelden. In hoofdstuk 6 zullen beide modellen worden vergeleken.

4.1 Werkwijze

Het te ontwikkelen lineaire model⁴ heeft de volgende vorm:

$$H \sim t + T_H + N + W + P + NAO + Q. \quad (1)$$

De componenten van het model zijn:

1. De waterstand H als afhankelijke variabele [m+NAP];
2. De tijd t [dag];
3. Het harmonisch getij T_H [m];
4. De nodale cyclus N [m], beschreven met vergelijking (2);
5. De wind W [m²/s²], beschreven met vergelijking (5);
6. De luchtdruk P [hPa];
7. De Noord-Atlantische Oscillatie NAO;
8. De rivierafvoer Q [m³/s].

Het model zal worden opgezet op basis van de periode 1970-2012, omdat in deze periode alle benodigde data voor alle variabelen beschikbaar is. Deze periode wordt gebruikt om het belang van de verschillende parameters na te gaan.

In eerste instantie wordt er vanuit gegaan dat er een lineaire relatie bestaat tussen de tijd en de waterstand. Bij de controle van de residuen van het model in paragraaf 4.5 wordt deze aanname gecontroleerd. Daarnaast zal een LOESS-methode worden toegepast, waarbij een fit met verschillende polynomen de data beschrijft, deze methode wordt in par. 4.6 verder uitgelegd. Een vergelijking tussen de uitkomsten van de lineaire regressie en de lokale regressie geeft een indicatie van de betrouwbaarheid van de uitkomsten.

Het volledig uitgeschreven model luidt:

$$H = c_0 + c_1 t + c_2 T_H + c_3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_4 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_5 U^2 \cos \delta + c_6 U^2 \sin \delta + c_7 P + c_8 NAO + c_9 Q, \quad (2)$$

⁴ De term lineair model heeft betrekking op de optelbaarheid van de verschillende effecten, en niet op een lineaire relatie tussen waterstand en tijd. Ook bij toevoeging van een kwadratische term t^2 zou het model lineair blijven.

waarin $T_N = 18,613$ jaar en in de termen voor de wind is $\delta = \pi/180 \cdot (\theta - \alpha)$. Tabel 4.1 geeft per station de hoek α waarbij de maximale windopzet optreedt.

Station	alfa [°N]
Delfzijl	117
Harlingen	108
Den Helder	107
IJmuiden	110
Hoek van Holland	117
Vlissingen	118
Gemiddeld	112

Tabel 4.1 Hoek (nautische conventie) waarbij de windopzet maximaal is.

De regressiecoëfficiënten uit vergelijking (2) worden bepaald met behulp van meervoudige lineaire regressie.

De structuur van het vervolg van dit hoofdstuk is als volgt:

- In paragraaf 4.2 worden de correlaties tussen bovenstaande variabelen beschreven.
- In paragraaf 4.3 wordt onderzocht wat de relevantie van de verschillende fysische variabelen is in deze context. Deze paragraaf eindigt met een selectie van een aantal variabelen uit bovenstaande lijst. Met een gereduceerde versie van het model uit vergelijking (1) worden vervolgens berekeningen gemaakt.
- Paragraaf 4.4 geeft een grafische representatie van de resultaten van dit gereduceerde model.
- In paragraaf 4.5 worden de residuen⁵ van het gereduceerde model gecontroleerd.
- Tenslotte wordt in paragraaf 4.6 lokale regressie toegepast, om te onderzoeken hoe de zeespiegelstijging in de tijd varieert.

4.2 Correlaties

Voordat het model wordt opgezet, worden de correlaties tussen de daggemiddelde waarden van de variabelen beschouwd. Figuur 4.1 toont correlatiecoëfficiënten, die een maat zijn voor de correlatie tussen de verschillende variabelen. De onderliggende data voor de waterstand en het harmonisch getij betreffen de gemiddelden over de zes stations. Per station zullen de correlaties enigszins verschillen. Dit komt in de volgende hoofdstukken aan de orde. Een positieve correlatiecoëfficiënt duidt aan dat relatief hoge waarden van de ene variabele relatief vaak samengaan met hoge waarden van de andere variabele. Op basis van correlatiecoëfficiënten kunnen geen uitspraken worden gedaan over causaliteit. Het nodale getij is reeds in de vorige studie onderzocht (Deltares 2010) en is voor de correlaties niet meegenomen.

⁵ De residuen van een model zijn gelijk aan het verschil tussen de gemeten waterstand en de met het model berekende waterstand. De regressiecoëfficiënten worden zodanig gekozen, dat de som van de kwadratische residuen minimaal is.

variabele	t	H	T _H	U ² cos	U ² sin	P	NAO	Q
t	1.00	0.13	0.01	-0.03	-0.04	0.00	-0.03	0.00
H	0.13	1.00	0.26	0.79	-0.35	-0.47	0.11	0.00
T _H	0.01	0.26	1.00	0.05	-0.15	-0.03	-0.02	-0.19
U ² cos	-0.03	0.79	0.05	1.00	-0.38	-0.20	0.15	0.02
U ² sin	-0.04	-0.35	-0.15	-0.38	1.00	0.33	-0.20	-0.03
P	0.00	-0.47	-0.03	-0.20	0.33	1.00	-0.02	-0.02
NAO	-0.03	0.11	-0.02	0.15	-0.20	-0.02	1.00	0.08
Q	0.00	0.00	-0.19	0.02	-0.03	-0.02	0.08	1.00

Figuur 4.1 Correlatiecoëfficiënten als maat voor de correlaties tussen de daggemiddelde waarden van alle onderzochte variabelen, waarbij de waterstand en het harmonisch getij eerst zijn gemiddeld over de getijdestations. Waarden groter dan 0,30 zijn blauw gekleurd en waarden kleiner dan -0,30 zijn geel gekleurd.

De correlatiecoëfficiënten tonen het volgende:

1. De zeespiegel stijgt in de tijd. Door de sterke variantie van de daggemiddelde waterstanden is de correlatiecoëfficiënt slechts 0,13.
2. De windsnelheid neemt af in de tijd.
3. Een positieve kustwaarts gerichte component van de windsnelheid (U²cos) hangt relatief vaak samen met een negatieve dwarscomponent (U²sin). Dit heeft te maken met de dominantie van (zuid-)westelijke winden in Nederland.
4. De waterstand neemt toe met een toename in de tijd, in het getij en in de kustwaarts gerichte component van de windsnelheid (U²cos). De afname van de waterstand met de dwarscomponent (U²sin) is (deels of geheel) gerelateerd aan het onder (3) genoemde. De waterstand neemt daarnaast af met een toename in de luchtdruk. Al deze correlaties zijn kwalitatief in overeenstemming met het fysisch gedrag van het systeem.
5. Een correlatie tussen de over de zes stations gemiddelde waterstand en de rivierafvoer bij Lobith is afwezig.
6. De meteorologische variabelen wind, luchtdruk en NAO zijn onderling duidelijk gecorreleerd.

7. De rivierafvoer heeft alleen een noemenswaardige correlatie met het harmonisch getij.
Deze relatie heeft geen fysische basis.

4.3 Selectie variabelen

4.3.1 Criteria

Er is een selectie gemaakt van de in paragraaf 4.1 genoemde variabelen op basis van vier criteria:

1. De door de variabele verklaarde variantie,
2. De regressiecoëfficiënten van de variabelen,
3. De beta-gewichten van de variabelen,
4. Het Akaike Informatiecriterium (AIC).

4.3.2 Verklaarde variantie

Deze paragraaf beschrijft eerst de methode waarmee de verklaarde variantie per variabele is bepaald. Daarna volgen de resultaten van deze analyse, en de conclusies op basis van de resultaten.

Methode

De waterstand kent een bepaalde variantie. De totale kwadratensom (sum of squares total) is een karakteristieke maat voor deze variantie. Deze is gelijk aan de som van de kwadratische afwijkingen van de waterstand ten opzichte van het gemiddelde van de reeks.

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^N (h - \bar{h})^2. \quad (3)$$

Met een model worden waterstanden berekend. Deze berekende waterstanden staan bekend als predicties; de gemeten waterstanden als observaties. De residuen zijn gelijk het verschil tussen de observaties en de predicties. De kwadratensom van de residuen (sum of squares residual) is gelijk aan de variantie die niet door het model verklaard kan worden.

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^N (h - h_{pred})^2. \quad (4)$$

De verklaarde variantie (sum of squares explained SS_{EXP}) is gelijk aan het verschil tussen SS_{TOT} en SS_{RES} .

$$SS_{exp} = SS_{tot} - SS_{res}. \quad (5)$$

De determinatiecoëfficiënt R^2 beschrijft welke fractie van de variantie verklaard is door het totale model.

$$R^2 = \frac{SS_{exp}}{SS_{tot}} \quad (6)$$

Met behulp van een variantie-analyse (analysis of variance, ANOVA) kan worden onderzocht welke variabele welk deel van de variantie verklaart. Deze onderverdeling kan alleen nauwkeurig worden uitgevoerd als de onafhankelijke variabelen alleen gecorreleerd zijn met de afhankelijke variabele, en niet onderling. Dit is, zoals blijkt uit paragraaf 4.2, niet het geval. De resultaten van de ANOVA moeten dan ook als indicatie van de verklaarde variantie per variabele worden gezien.

Vanwege de correlaties tussen de onafhankelijke variabelen maken we gebruik van een type III ANOVA. Met deze methode wordt de verklaarde variantie per variabele bepaald door de variabelen één voor één buiten beschouwing te laten. Het verschil in verklaarde variantie is dan gelijk aan de door die variabele verklaarde variantie. De verklaarde variantie per variabele telt bij een type III ANOVA niet noodzakelijkerwijs op tot de totale verklaarde variantie SS_{EXP} . Het verschil tussen de som van de partiële SS_{EXP} en de totale SS_{EXP} is de verklaarde variantie die niet toegeschreven kan worden aan een specifieke variabele.

Resultaten

Tabel 4.2 geeft per station weer wat de totale kwadratensom (SS_{TOT}) is, een maat voor de variantie van de daggemiddelde waterstand bij dat station. Een deel van deze variantie (SS_{EXP}) kan worden verklaard met het model uit vergelijking (1). Met deze beide waarden kan de determinatiecoëfficiënt R^2 worden bepaald, gelijk aan het percentage van de variantie dat door het model verklaard is.

Station	SS_{TOT}	SS_{EXP}	R^2
Delfzijl	1386	1052	75,9%
Harlingen	1377	1144	83,1%
Den Helder	974	768	80,7%
IJmuiden	898	715	79,6%
Hoek van Holland	726	558	76,8%
Vlissingen	719	546	75,9%
Gemiddeld	942	749	79,5%

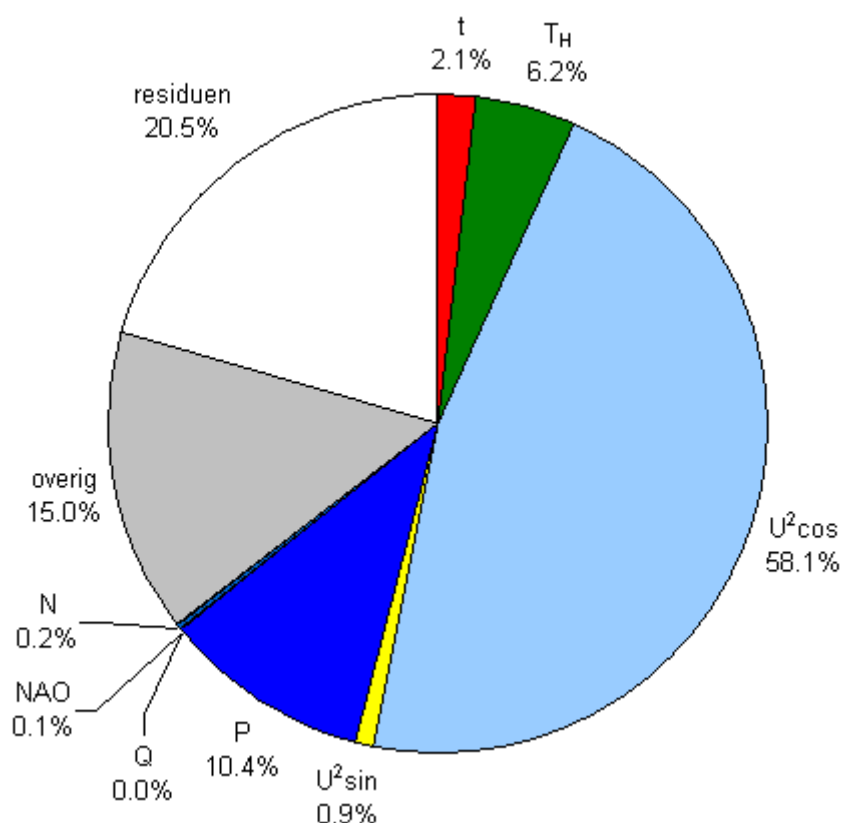
Tabel 4.2 De totale variantie SS_{TOT} (m^2), de verklaarde variantie SS_{TOT} en de fractie van de totale variantie die wordt verklaard $R^2 = SS_{EXP}/SS_{TOT}$.

Tabel 4.3 toont per station opnieuw de totale verklaarde variantie R^2 . In de andere kolommen wordt daarbij nu ook de onderverdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen uit vergelijking (1) gegeven. De laatste kolom geeft de verklaarde variantie die niet toegeschreven kan worden aan één specifieke variabele.

Station	R^2	t	T_H	N	$U^2\cos$	$U^2\sin$	P	NAO	Q	overig
Delfzijl	75,9%	1,6%	3,5%	0,1%	55,3%	0,2%	2,7%	0,1%	0,0%	12,3%
Harlingen	83,1%	0,6%	4,4%	0,1%	51,9%	0,3%	6,3%	0,1%	0,0%	19,3%
Den Helder	80,7%	1,8%	6,6%	0,2%	42,3%	0,6%	10,9%	0,1%	0,0%	18,2%
IJmuiden	79,6%	2,7%	6,6%	0,3%	39,7%	0,8%	13,6%	0,0%	0,0%	15,9%
Hoek van Holland	76,8%	3,5%	6,9%	0,2%	37,9%	1,2%	16,3%	0,0%	0,2%	10,6%
Vlissingen	75,9%	3,1%	7,7%	0,2%	33,7%	1,7%	20,7%	0,0%	0,0%	8,8%
Gemiddeld	79,5%	2,1%	4,9%	0,2%	46,2%	0,7%	10,4%	0,1%	0,0%	15,0%

Tabel 4.3 Totale verklaarde variantie R^2 en een verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen. De waarden in de laatste kolom geven de verklaarde variantie, die niet specifiek toegeschreven kon worden aan een individuele variabele.

Tabel 4.3 geeft een grafische weergave van de verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen voor het gemiddelde van de zes getijdestations.



Figuur 4.2 Verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen voor het gemiddelde van de zes getijdestations.

Conclusies

De volgende conclusies volgen uit de getallen in Tabel 4.2 en Tabel 4.3:

1. Met het model dat beschreven wordt met vergelijking (1) kan ongeveer 80% van de variantie van de daggemiddelde waterstanden worden verklaard.

2. De wind verklaart de meeste variantie. Bij de stations in de ondiepe Waddenzee (Delfzijl en Harlingen) verklaart de wind meer variantie dan bij de stations langs de Noordzee. Dit is gerelateerd aan negatieve relatie tussen waterdiepte en waterstandsofzet.
3. De luchtdruk verklaart 3 tot 21% van de variantie. Bij de stations langs de Noordzee verklaart de luchtdruk meer variantie dan bij de stations in de ondiepe Waddenzee (Harlingen, en in het bijzonder Delfzijl). Dit verschil kan mogelijk worden verklaard doordat luchtdrukverschillen pas waterstandsverschillen kunnen veroorzaken, als dit niet verhinderd wordt door de geometrie.
4. Het percentage van de variantie dat verklaard wordt door het getij varieert, maar dit is vooral het gevolg van variaties in de totale variantie SS_{TOT} (Tabel 4.2).
5. De NAO lijkt weinig meer toe te voegen als de wind en de luchtdruk reeds in het model aanwezig zijn. Deze drie variabelen zijn onderling sterk gecorreleerd (paragraaf 4.2).
6. De rivierafvoer verklaart geen variantie, behalve bij Hoek van Holland. Dit is niet verrassend. De verklaarde variantie bij Hoek van Holland is echter ook slechts 0,2%.
7. De processen met een grote tijdschaal, de zeespiegelstijging en de nodale cyclus, verklaren relatief weinig van de variantie van de daggemiddelde waterstanden.
8. Ongeveer 10 tot 20% van de variantie kon niet toegewezen worden aan één individuele variabele.

4.3.3 Regressiecoëfficiënten

Methode

De regressiecoëfficiënten uit vergelijking (2) zijn bepaald met behulp van meervoudige lineaire regressie.

Resultaten

Tabel 4.4 toont per station het nulpunt en de regressiecoëfficiënten van het model, dat beschreven wordt met vergelijking (2).

Station	nulpunt	t	T_H	N ampl	N fase	$U^2\cos$	$U^2\sin$	P	NAO	Q
Vergelijking (2)	c0	c1	c2	*	*	c5	c6	c7	c8	c9
Dimensie	m	m/jaar	-	m	rad	s^2/m	s^2/m	m/hPa	-	s/m^2
Delfzijl	-0,97	3.1E-3	0,83	0,015	1,15	7,4E-3	4,3E-4	-5,0E-3	5,5E-3	4,6E-6
Harlingen	4,00	1.9E-3	0,73	0,013	0,56	6,9E-3	5,1E-4	-7,7E-3	5,8E-3	2,1E-6
Den Helder	3,15	2.7E-3	0,77	0,016	0,97	5,2E-3	6,3E-4	-8,5E-3	4,6E-3	2,5E-7
IJmuiden	2,91	3.2E-3	0,80	0,020	1,05	4,9E-3	7,1E-4	-9,1E-3	3,7E-3	1,7E-6
Hoek van Holland	2,64	3.3E-3	0,88	0,014	1,05	4,5E-3	7,2E-4	-9,0E-3	2,3E-3	8,2E-6
Vlissingen	4,11	3.1E-3	0,92	0,014	0,59	4,2E-3	8,4E-4	-1,0E-2	2,2E-3	1,1E-7
Gemiddeld	2,59	2.9E-3	0,79	0,015	0,93	5,5E-3	6,4E-4	-8,2E-3	4,1E-3	2,6E-6

Tabel 4.4 Nulpunt van het model en regressiecoëfficiënten per variabele en per station

Conclusies

De volgende conclusies volgen uit de getallen in Tabel 4.4:

1. Het nulpunt is de situatie waarbij alle onafhankelijke variabelen gelijk zijn aan nul (tijd = 0 jaar, luchtdruk = 0 hPa, enz.). Dit nulpunt varieert sterk, en heeft weinig fysische betekenis.
2. De regressiecoëfficiënt voor de tijd is de berekende zeespiegelstijging voor de periode 1970-2012. Deze varieert tussen de 19 en 33 cm/eeuw.
3. De regressiecoëfficiënt voor het harmonisch getij ligt tussen 0,74 en de 0,92. Idealiter zou deze exact 1,00 moeten zijn. De data in de xtide database (zie paragraaf 3.2) is berekend op basis van een analyse van de waterstanden in een bepaalde periode. De resultaten zijn mogelijk niet geheel representatief voor de periode 1970-2012, de berekening kan afwijkingen bevatten, en de analyse in het voorliggende onderzoek is niet volmaakt.
4. De amplitude en de fase van de nodale cyclus zijn geen regressiecoëfficiënten, maar afgeleide variabelen. Ze zijn berekend op basis van de regressiecoëfficiënten c3 en c4 via vergelijking (3). De berekende amplitude van de nodale cyclus varieert tussen 1,3 en 2,0 cm. Baart et al. 2012 geeft een amplitude van 1,2 +/- 0,92 cm voor de Nederlandse kust voor de periode 1890-2008. De berekende orde van grootte is dus correct. Merk op dat de analyseperiode 1970-2012 relatief kort is voor het bepalen van een signaal met een periode van 18,6 jaar.
5. Uit de regressiecoëfficiënten voor de wind ($U^2 \cos$ term) blijkt net als in paragraaf 4.3.2 dat de wind op de Waddenzee meer invloed heeft dan op de Noordzee. De kustlangse component van de wind ($U^2 \sin$) heeft een regressiecoëfficiënt die een orde kleiner is dan de opzet veroorzakende component ($U^2 \cos$).
6. De regressiecoëfficiënt voor de luchtdruk is voor de stations langs de Noordzee -0,9 tot -1,0 cm/hPa. Dit komt overeen met de theoretische waarde uit vergelijking (4). Bij de stations in de Waddenzee hebben luchtdrukverschillen minder effect. Dit verschil was reeds zichtbaar in paragraaf 4.3.2.
7. De regressiecoëfficiënten voor de NAO zijn positief. Dit is kwalitatief gezien correct.
8. De regressiecoëfficiënten voor de rivierafvoer zijn positief. Dit is kwalitatief gezien correct.

4.3.4 Beta-gewichten

Methode

De relatie tussen het beta-gewicht voor variabele i en de corresponderende regressiecoëfficiënt C is als volgt afhankelijk van de standaardafwijkingen van de waterstand σ_h en de betreffende variabele σ_i :

$$\beta_i = C_i \frac{\sigma_h}{\sigma_i}$$

Beta-gewichten zijn dimensieloos, en te interpreteren als een verandering van een aantal standaardafwijkingen in de waterstand bij een verandering van één standaardafwijking van één van de variabelen, waarbij de andere variabelen constant worden gehouden. In tegenstelling tot bij de regressiecoëfficiënten kan op basis van de grootte van de beta-gewichten een conclusie worden getrokken over de gevoeligheid van de zeewaterstand voor variaties in de verschillende variabelen.

Resultaten

Tabel 4.5 toont per station en per variabele het beta-gewicht.

Station	t	T _H	N	U ² cos	U ² sin	P	NAO	Q
Delfzijl	0,13	0,19	0,05	0,80	0,05	-0,17	0,03	0,02
Harlingen	0,08	0,22	0,05	0,79	0,06	-0,27	0,03	0,01
Den Helder	0,14	0,26	0,07	0,72	0,09	-0,35	0,03	0,00
IJmuiden	0,17	0,27	0,08	0,69	0,11	-0,39	0,02	0,01
Hoek van Holland	0,19	0,27	0,06	0,67	0,13	-0,43	0,01	0,04
Vlissingen	0,18	0,29	0,06	0,63	0,15	-0,49	0,01	0,00
Gemiddeld	0,15	0,23	0,06	0,74	0,10	-0,34	0,02	0,01

Tabel 4.5 Beta-gewichten per variabele en per station.

Conclusies

Opnieuw blijkt dat variaties in de wind en de luchtdruk de sterkste bijdrage leveren aan de variatie van de daggemiddelde waterstand. Variaties in de NAO en de rivierafvoer leveren nauwelijks een bijdrage aan de totale variatie van de waterstand.

4.3.5 Akaike Informatiecriterium

Methode

Een model heeft vrijheidsgraden. Dit kunnen bijvoorbeeld de regressiecoëfficiënten voor verklarende parameters of voor hogere orde polynomen zijn. Met elke vrijheidsgraad die aan een model wordt toegevoegd, neemt de in totaal verklaarde variantie toe. Dit is ook het geval als er geen fysische relatie bestaat tussen de afhankelijke en onafhankelijke variabele. Er is daarom behoefte aan een criterium, waarmee wordt getest of de toevoeging van een vrijheidsgraad ook leidt tot voldoende verbetering van het model.

Het Akaike Informatiecriterium (AIC) maakt een afweging tussen de toevoeging van een vrijheidsgraad en de verbetering van de voorspellende kracht van het model. Bij vergelijking tussen verschillende modellen geldt dat het model met het laagste AIC (dit kan ook negatief zijn) de voorkeur heeft.

Binnen deze context is getest wat het verschil in AIC is tussen het complete model en het model waarbij een variabele wordt verwijderd. Bij een belangrijke variabele leidt deze verwijdering tot een sterke toename van het AIC, en bij een volstrekt niet ter zake doende variabele zal de verwijdering resulteren in een afname van het AIC.

Resultaten

Tabel 4.6 toont per station het AIC voor het totale model (vergelijking (2)), en geeft weer hoe het AIC verandert als een variabele wordt verwijderd. Een positieve verandering betekent dat het model slechter wordt door de verwijdering van de variabele. Een negatieve verandering betekent dat het model beter wordt. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat het AIC door de grote hoeveelheid data het model relatief weinig waarde hecht aan een verandering van het aantal vrijheidsgraden. De verschillen in AIC tussen de variabelen zijn meer van belang.

Station	Totaal	t	T _H	N	U ² cos	U ² sin	P	NAO	Q
Delfzijl	-60447	998	2139	78	18727	142	1643	40	17
Harlingen	-66083	559	3648	85	22027	260	4942	65	4
Den Helder	-69523	1415	4618	165	18253	487	7069	51	-2
IJmuiden	-69895	1923	4405	256	16977	637	8018	32	3
Hoek van Holland	-71236	2200	4077	135	15236	780	8380	12	121
Vlissingen	-70770	1887	4368	124	13746	1041	9753	10	-2
Gemiddeld	-69082	1503	3368	142	18550	515	6458	39	9

Tabel 4.6 AIC voor het totale model (tweede kolom) en verandering in AIC bij verwijdering van één variabele (overige kolommen).

Conclusies

Voor het gemiddelde van de stations langs de Nederlandse kust geeft het AIC de volgende volgorde van belangrijkheid aan in het geval van een model op basis van daggemiddelde waarden voor alle variabelen:

1. Wind
2. Luchtdruk
3. Harmonisch getij
4. Tijd
5. Dwarscomponent van de wind
6. Nodale cyclus
7. NAO
8. Rivierafvoer

4.3.6 Samenvatting en selectie van variabelen

Op basis van, de resultaten, analyses en beschouwingen van de fysica uit bovenstaande paragrafen, komen we tot de volgende selectie van variabelen:

1. Tijd
2. Harmonisch getij
3. Nodale cyclus
4. Wind
5. Luchtdruk

Het harmonisch getij, de wind en de luchtdruk verklaren gezamenlijk het overgrote deel van de variantie van de daggemiddelde waterstanden. De tijd is essentieel en hangt samen met de zeespiegelstijging waar we in geïnteresseerd zijn. Uit Deltares (2010) en Baart et al. (2012) blijkt dat de nodale cyclus belangrijk is om laagfrequente fluctuaties in de zeewaterstand te kunnen verklaren. De overige componenten voegen niet voldoende toe, om deel uit te maken van het gereduceerde model.

Het gereduceerde model is te beschrijven met de volgende vergelijking:

$$H = c_0 + c_1 t + c_2 T_H + c_3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_4 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_5 U^2 \cos \delta + c_6 P \quad (7)$$

De waarde van de regressiecoëfficiënten in Tabel 4.4 is niet meer van toepassing na het verwijderen van enkele modelcomponenten. De coëfficiënten die van toepassing zijn op het model van vergelijking (7) zijn opgenomen in Tabel 4.7. De gevonden waarden voor de zeespiegelstijging (coëfficiënt C1 in cm/eeuw) zijn beduidend hoger dan gevonden in eerdere analyses waarbij langere perioden geanalyseerd zijn.

Station	nulpunt	t			T _H	N ampl	N fase	U ² cos	P
Vergelijking (7)	c0	c1	2,5%	97,5%	c2	*	*	c5	c6
Dimensie	m	cm/eeuw			-	m	rad	s ² /m	m/hPa
Delfzijl	-1,25	29,8	27,9	31,7	0,78	0,016	1,13	7,3E-3	-4,6E-3
Harlingen	3,73	18,1	16,5	19,7	0,70	0,014	0,52	6,7E-3	-7,2E-3
Den Helder	2,81	26,4	25,0	27,8	0,74	0,016	0,92	5,0E-3	-8,0E-3
IJmuiden	2,49	30,8	29,3	32,2	0,76	0,020	1,03	4,7E-3	-8,5E-3
Hoek van Holland	2,15	31,7	30,4	33,1	0,80	0,016	1,08	4,2E-3	-8,3E-3
Vlissingen	3,48	29,5	28,1	30,8	0,87	0,014	0,55	3,9E-3	-9,2E-3
Gemiddeld	2,19	27,7	26,2	29,1	0,74	0,016	0,91	5,3E-3	-7,6E-3

Tabel 4.7 Nulpunt en regressiecoëfficiënten van vergelijking (7) per variabele en per station. Bij de regressiecoëfficiënten voor de tijd (de zeespiegelstijging, omgerekend van m/jaar naar cm/eeuw) is ook het 95% betrouwbaarheidsinterval weergegeven.

Door het verwijderen van variabelen uit het totale model verschuiven ook de percentages met verklaarde variantie per variabele. Dit gedrag wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van correlaties tussen de variabelen. De totale verklaarde variantie R^2 en de verklaarde variantie per variabele van het gereduceerde model zijn opgenomen in Tabel 4.8. Vergelijking van Tabel 4.7 en Tabel 4.8 laat zien dat het deel van de verklaarde variantie, dat niet specifiek aan één modelcomponent is toe te schrijven, is afgenomen door het reduceren van het aantal componenten.

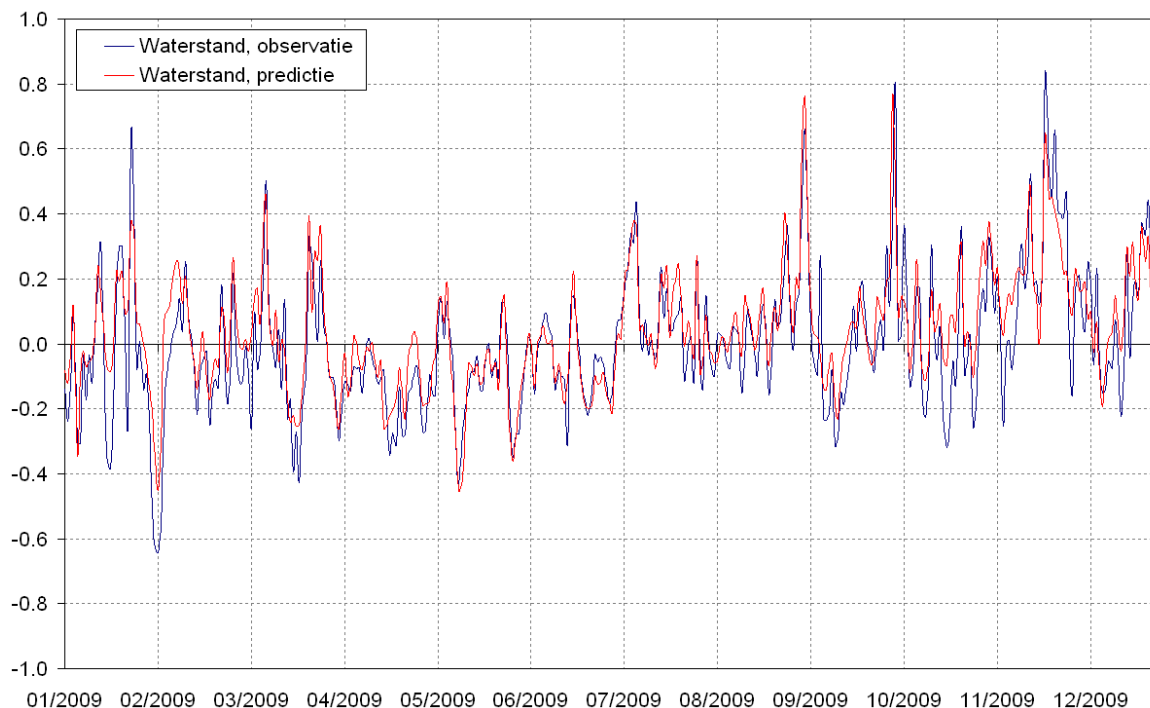
Station	R^2	t	T _H	N	U ² cos	P	overig
Delfzijl	75,6%	1,5%	3,3%	0,1%	60,4%	2,4%	7,7%
Harlingen	82,7%	0,6%	4,3%	0,1%	57,2%	6,0%	14,6%
Den Helder	80,1%	1,7%	6,3%	0,2%	45,1%	10,3%	16,5%
IJmuiden	78,8%	2,5%	6,3%	0,4%	41,4%	12,7%	15,6%
Hoek van Holland	75,5%	3,3%	6,0%	0,3%	38,3%	15,2%	12,4%
Vlissingen	74,2%	2,9%	7,3%	0,2%	32,7%	19,1%	12,1%
Gemiddeld	78,8%	1,9%	4,5%	0,2%	48,8%	9,7%	13,6%

Tabel 4.8 Totale verklaarde variantie R^2 en een verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende componenten van vergelijking (7). De waarden in de laatste kolom geven de verklaarde variantie, die niet specifiek toegeschreven kon worden aan een individuele variabele.

4.4 Grafische weergave reproductie waterstanden

Bij wijze van illustratie toont Figuur 4.3 de tijdserie met de daggemiddelde waterstanden bij Den Helder in 2009 (in blauw), samen met de op basis van vergelijking (7) berekende waterstand (in rood). Het is duidelijk zichtbaar dat het globale patroon van het

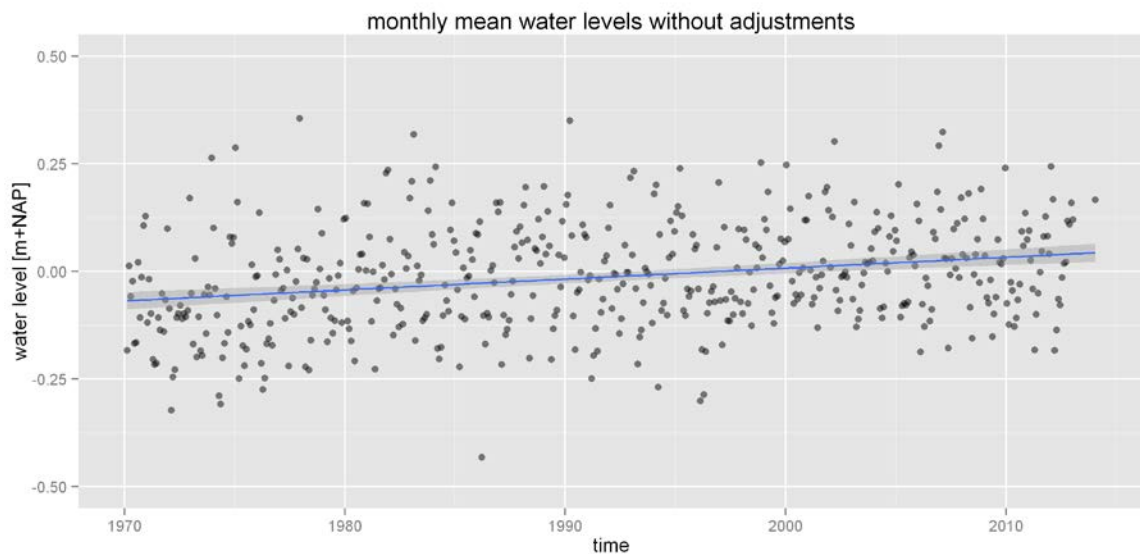
waterstandsverloop goed wordt gereproduceerd met het model. Bij deze reproductie hoort een determinatiecoëfficiënt R^2 van 80,1%.



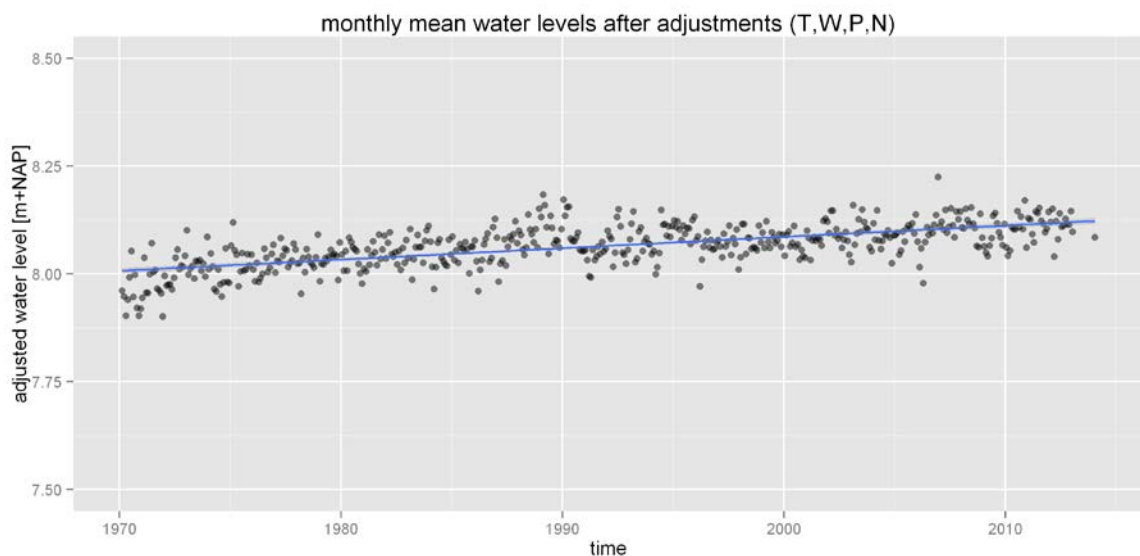
Figuur 4.3 Gemeten waterstand bij Den Helder in 2009 (in blauw) met de op basis van vergelijking (7) berekende waterstand (in rood).

Het effect van het toevoegen van de variabelen wind, luchtdruk, harmonisch getij en nodale cyclus wordt duidelijk zichtbaar als Figuur 4.5 vergeleken wordt met Figuur 4.4. Figuur 4.4 toont de gemeten maandgemiddelde waterstanden bij Den Helder, inclusief een lineaire trend. Figuur 4.5 toont hetzelfde, maar hier zijn de waterstanden eerst gecorrigeerd voor het effect van wind, luchtdruk, harmonisch getij en nodale cyclus voordat de maandgemiddelden zijn berekend. De correcties zijn uitgevoerd op basis van de regressiecoëfficiënten in Tabel 4.7.

Bij de andere stations is een zelfde beeld zichtbaar. In bijlage D zijn deze figuren voor alle beschouwde stations opgenomen. Het verschil in trends komt in hoofdstuk 6 aan bod



Figuur 4.4 Maandgemiddelde waterstanden bij Den Helder



Figuur 4.5 Maandgemiddelde waarden van de gecorrigeerde waterstanden bij Den Helder. Correcties zijn toegepast voor harmonisch getij (T), wind (W), luchtdruk (P) en de nodale cyclus (N).

De verticale as van figuur 4.5 toont de gecorrigeerde waterstand. Dit is de fictieve waterstand die optreedt wanneer alle verklarende variabelen een waarde van nul hebben. Het is dus in dit geval de waterstand bij een harmonisch en nodaal getij van beide 0 m+NAP, een windsnelheid van 0 m/s en een luchtdruk van 0 hPa. De fysisch niet realistische waarde voor de luchtdruk zorgt ervoor dat de getallen langs de verticale as zeer groot zijn. De absolute waarde van deze getallen heeft dan ook geen betekenis. Alleen de trend in het signaal is van belang.

4.5 Controle residuen

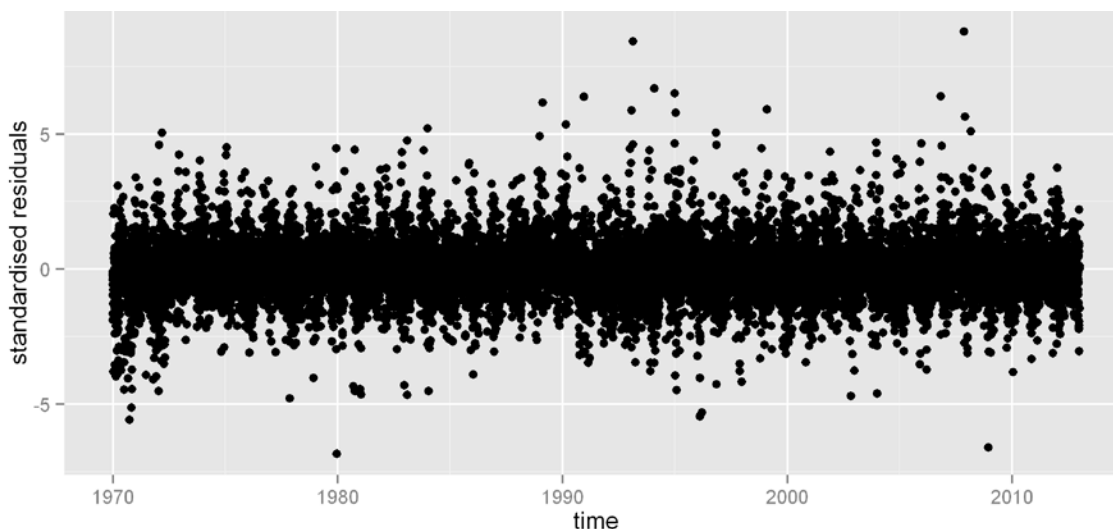
Om de toepasbaarheid van een lineair model met een lineaire trend in de tijd te controleren, is een controle uitgevoerd van de residuen. De residuen zijn gelijk aan het verschil tussen de gemeten waterstand (de observaties) en de door het model berekende waterstand (de predicties). Zie paragraaf 4.3.2.

Er zijn drie controles uitgevoerd:

1. De residuen dienen niet structureel te veranderen als functie van de tijd. Wanneer dit wel het geval is, is de aanname van een lineaire trend in de tijd niet geldig.
2. De residuen dienen niet structureel te veranderen als functie van de afhankelijke variabele (de waterstand). Wanneer dit wel het geval is, is er geen sprake van homoscedasticiteit. Homoscedasticiteit is een belangrijke voorwaarde voor het toepassen van bijvoorbeeld correlatiecoëfficiënten (paragraaf 4.2) of ANOVA's (paragraaf 4.3.2).
3. Opeenvolgende residuen behoren onafhankelijk te zijn. Als opeenvolgende residuen (sterk) gecorreleerd zijn, is een autoregressief (AR) model eerder van toepassing dan een lineaire regressie.

4.5.1 Residuen als functie van de tijd

Figuur 4.6 toont de gestandaardiseerde residuen als functie van de tijd voor het gemiddelde van de zes stations. Uit een visuele inspectie lijkt het dat er geen significante verandering is. Dit volgt ook uit Figuur 4.5. Een lineaire trend in de tijd lijkt dus van toepassing te zijn. Dit is ook het geval voor de individuele zes stations. Vergelijking van de lineaire trend met de uitkomsten van lokale regressie (paragraaf 4.6) geeft hier aanvullend inzicht in.

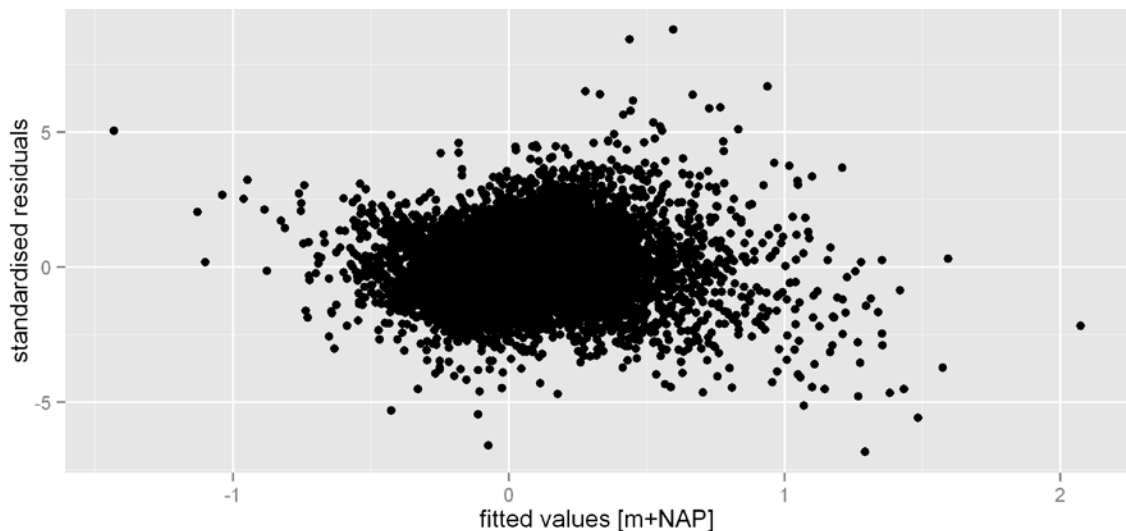


Figuur 4.6 Gestandaardiseerde residuen als functie van de tijd voor het gemiddelde van de zes stations.

4.5.2 Homoscedasticiteit

Figuur 4.7 toont de gestandaardiseerde residuen als functie van de afhankelijke variabele (de waterstand) voor het gemiddelde van de zes stations. Te zien is dat de extreme waterstanden (daggemiddeld boven 1 m+NAP) relatief vaak samenvallen met negatieve residuen. Dit houdt in dat de extreem hoge waterstanden meestal enigszins worden onderschat door het model. Voor de huidige toepassing (het bepalen van zeespiegelstijging) is de voorspelling van extreme waterstanden geen doel op zich.

Een vuistregel voor de aanname van homoscedasticiteit is: de kleinste geschatte standaardafwijking mag niet meer dan twee maal zo klein zijn als de grootste. In het bereik waarin het overgrote deel van de metingen zich bevindt (-0,5 tot +0,5 m+NAP) neemt de standaardafwijking van de residuen enigszins toe, maar (op basis van visuele inspectie) met minder dan een factor twee.



Figuur 4.7 Gestandaardiseerde residuen als functie van de berekende afhankelijke variabele (de waterstand in $m+NAP$) voor het gemiddelde van de zes stations.

4.5.3 Autoregressie

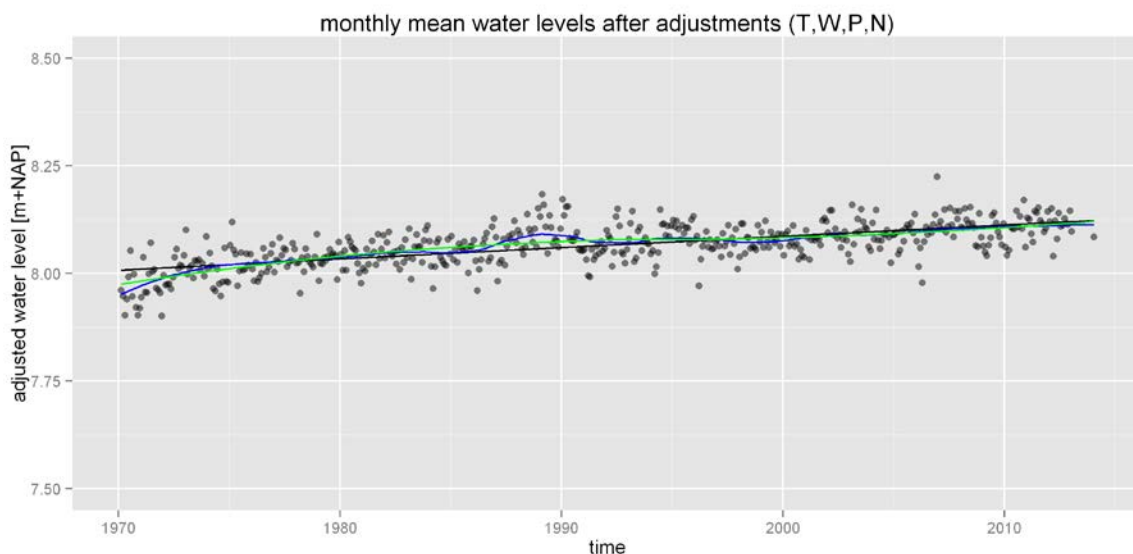
Om de afhankelijkheid van opeenvolgende residuen te onderzoeken, is de Augmented Dickey–Fuller test (ADF) toegepast. Deze test vergelijkt de residuen van opeenvolgende dagen, en onderzoekt of er sprake is van significante autoregressie. Dit bleek voor alle stations niet het geval te zijn.

4.6 Lokale regressie

In de voorgaande berekeningen is consequent eenvoudige (meervoudige) lineaire regressie toegepast. Er wordt daarbij uitgegaan van een lineaire relatie tussen tijd en waterstand, en alle data tussen 1970 en 2012 wordt op gelijke wijze meegenomen. Een flexibeler alternatief is lokale regressie (Local regrESSion, afgekort als LOESS).

Bij de LOESS methode wordt geen functievoorschrift gebruikt, maar worden (meestal lineaire en kwadratische) polynomen door de data gefit, waarbij telkens slechts een deel van de data wordt gebruikt. Deze procedure wordt toegepast op elk punt van de tijdreeks. Door middel van een bandbreedte (een parameter tussen ongeveer 0 en 1) kan worden opgegeven welk deel van de data gebruikt moet worden ter bepaling van de lokale polynomen. Bij een lage bandbreedte reageert de regressiefunctie sterk op fluctuaties in de data. Een hoge bandbreedte (maximaal 1) resulteert in een glad verloop van de regressiefunctie.

Figuur 4.8 toont hetzelfde als Figuur 4.5, alleen met lokale regressie in plaats van lineaire regressie. Er is gebruik gemaakt van een bandbreedte van 0,25 (blauwe lijn) en 0,75 (groene lijn). In bijlage D zijn dergelijke figuren voor de andere stations opgenomen.



Figuur 4.8 Maandgemiddelde waarden van de gecorrigeerde waterstanden bij Den Helder. Correcties zijn toegepast voor harmonisch getij (T), wind (W), luchtdruk (P) en de nodale cyclus (N). Vervolgens is een regressielijn bepaald met de LOESS methode met bandbreedte 0,25 (blauw) of 0,75 (groen). De lineaire trendlijn is ter vergelijking in zwart weergegeven.

Uit Figuur 4.8 blijkt dat een bandbreedte van 0,25 (25% van de data voor 1970-2012 wordt gebruikt) te klein is om uitspraken te doen over zeespiegelstijging. Toepassing van deze waarde zou op bepaalde momenten zelfs resulteren in een aanzienlijke zeespiegeldaling.

De lineaire trendlijn en de regressiefunctie met een bandbreedte van 0,75 komen sterk overeen. Tussen 1970 en 1980 ligt het resultaat van de lokale regressie iets onder de lineaire trendlijn, tussen 1970 en 1995 iets erboven, en vanaf 1995 vallen ze ongeveer samen.

Bij de andere stations liggen het resultaat van de lokale regressie en de lineaire trendlijn overwegend nog wat dichter bij elkaar. Zie bijlage D. Gemiddeld langs de kust zijn de afwijkingen tussen beide klein.

5 Modelopzet met jaargemiddelden

Dit hoofdstuk beschrijft de opzet en de resultaten van een model, dat de waterstand beschrijft aan de hand van de variabelen zoals beschreven in het hoofdstuk 3, plus de onafhankelijke variabele tijd. De relatie tussen tijd en waterstand is de zeespiegelstijging waar we naar op zoek gaan. Het model dat beschreven wordt in dit hoofdstuk maakt gebruik van jaargemiddelde waarden van alle variabelen. Hoofdstuk 4 kent een zelfde inhoud, maar beschrijft een model dat gebruik maakt van daggemiddelden. In hoofdstuk 6 zullen beide modellen worden vergeleken.

5.1 Werkwijze

De werkwijze op basis van jaargemiddelden is gelijk aan de werkwijze op basis van daggemiddelden. Het te ontwikkelen lineaire model heeft daarom opnieuw de volgende vorm:

$$H \sim t + T_H + N + W + P + NAO + Q. \quad (1)$$

De componenten van het model zijn:

1. De waterstand H als afhankelijke variabele [m+NAP];
2. De tijd t [jaar];
3. Het harmonisch getij T_H [m];
4. De nodale cyclus N [m], beschreven met vergelijking (2);
5. De wind W [m²/s²], beschreven met vergelijking (5);
6. De luchtdruk P [hPa];
7. De Noord-Atlantische Oscillatie NAO;
8. De rivierafvoer Q [m³/s].

Het model zal worden opgezet op basis van de periode 1970-2012, omdat in deze periode alle benodigde data voor alle variabelen beschikbaar is.

Het volledig uitgeschreven model luidt, in overeenstemming met vergelijking (2):

$$H = c_0 + c_1 t + c_2 T_H + c_3 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_4 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_5 U^2 \cos \delta + c_6 U^2 \sin \delta + c_7 P + c_8 NAO + c_9 Q, \quad (2)$$

waarin $T_N = 18,613$ jaar en in de termen voor de wind is $\delta = \pi/180 \cdot (\theta - \alpha)$. Omdat een jaargemiddelde windrichting weinig betekenis heeft, zijn de twee termen voor de wind eerst per dag bepaald op basis van de hoeken α uit Tabel 4.1, en vervolgens zijn deze termen over het jaar gemiddeld voor het station de Kooy.

De structuur van het vervolg van dit hoofdstuk is als volgt:

- In paragraaf 5.2 worden de correlaties tussen bovenstaande variabelen beschreven.
- In paragraaf 5.3 wordt onderzocht wat de relevantie van de verschillende fysische variabelen is in deze context. Deze paragraaf eindigt met een selectie van een aantal

variabelen uit bovenstaande lijst. Met een gereduceerde versie van het model uit vergelijking (2) worden vervolgens berekeningen gemaakt.

- Paragraaf 5.4 geeft een grafische weergave van de resultaten van dit gereduceerde model.
- In paragraaf 5.4.1 worden de residuen van het gereduceerde model gecontroleerd.
- Tenslotte wordt in paragraaf 5.5 lokale regressie toegepast, om te onderzoeken hoe de zeespiegelstijging in de tijd varieert.

5.2 Correlaties

Figuur 5.1 toont correlatiecoëfficiënten, die een maat zijn voor de correlatie tussen de verschillende variabelen. Een nadere duiding van zulke correlatiecoëfficiënten is gegeven in paragraaf 4.2.

variabele	t	H	Th	U ² cos	U ² sin	P	NAO	Q
t	1.00	0.68	0.05	-0.20	-0.34	0.02	-0.06	0.01
H	0.68	1.00	0.03	0.41	-0.62	-0.25	0.12	0.45
Th	0.05	0.03	1.00	0.03	0.06	-0.05	-0.07	-0.08
U ² cos	-0.20	0.41	0.03	1.00	-0.40	-0.20	0.31	0.32
U ² sin	-0.34	-0.62	0.06	-0.40	1.00	0.27	-0.56	-0.22
P	0.02	-0.25	-0.05	-0.20	0.27	1.00	0.05	-0.58
NAO	-0.06	0.12	-0.07	0.31	-0.56	0.05	1.00	-0.12
Q	0.01	0.45	-0.08	0.32	-0.22	-0.58	-0.12	1.00

Figuur 5.1 Correlatiecoëfficiënten als maat voor de correlaties tussen de jaargemiddelde waarden van alle onderzochte variabelen, waarbij de waterstand en het harmonisch getij eerst zijn gemiddeld over de getijdestations. Waarden groter dan 0,30 zijn blauw gekleurd en waarden kleiner dan -0,30 zijn geel gekleurd.

De correlatiecoëfficiënten tonen het volgende:

1. De zeespiegel stijgt in de tijd.
2. De windsnelheid neemt af in de tijd.
3. Een positieve kustwaarts gerichte component van de windsnelheid ($U^2\cos$) hangt relatief vaak samen met een negatieve dwarscomponent ($U^2\sin$). Dit heeft te maken met de dominantie van (zuid-)westelijke winden in Nederland.
4. De waterstand neemt toe met een toename in de tijd, in de kustwaarts gerichte component van de windsnelheid ($U^2\cos$) en in het debiet. De afname van de waterstand met de dwarscomponent ($U^2\sin$) is (deels of geheel) gerelateerd aan het onder (3) genoemde. De waterstand neemt daarnaast af met een toename in de luchtdruk. Al deze correlaties zijn kwalitatief in overeenstemming met het fysisch gedrag van het systeem.
5. De meteorologische variabelen wind, luchtdruk en NAO zijn onderling duidelijk gecorreleerd.
6. De jaargemiddelde rivierafvoer is duidelijk gecorreleerd met de jaargemiddelde meteorologische variabelen. De correlatie tussen de rivierafvoer en de waterstand is mogelijk een indirecte relatie tussen jaargemiddelde meteorologie en rivierafvoer enerzijds, en tussen jaargemiddelde meteorologie en de waterstand anderzijds.

5.3 Selectie variabelen

5.3.1 Criteria

We maken een selectie van de in paragraaf 5.1 genoemde variabelen op basis van vier criteria:

1. De door de variabele verklaarde variantie,
2. De regressiecoëfficiënten van de variabelen,
3. De beta-gewichten van de variabelen,
4. Het Akaike Informatiecriterium (AIC).

5.3.2 Verklaarde variantie

Methode

De methode ter bepaling van de verklaarde variantie door het model als geheel en door de afzonderlijke modeltermen is besproken in paragraaf 4.3.2.

Resultaten

Tabel 5.1 geeft per station weer wat de totale kwadratensom (SS_{TOT}) is, een maat voor de variantie van de jaargemiddelde waterstanden bij dat station. Een deel van deze variantie (SS_{EXP}) kan worden verklaard met het model uit vergelijking (2). Met deze beide waarden kan de determinatiecoëfficiënt R^2 worden bepaald, gelijk aan het percentage van de variantie dat door het model verklaard is.

Station	SS _{TOT}	SS _{EXP}	R ²
Delfzijl	0,108	0,094	87,4%
Harlingen	0,089	0,069	78,2%
Den Helder	0,087	0,078	89,2%
IJmuiden	0,103	0,093	90,4%
Hoek van Holland	0,094	0,083	88,3%
Vlissingen	0,080	0,071	89,0%
Gemiddeld	0,086	0,077	89,6%

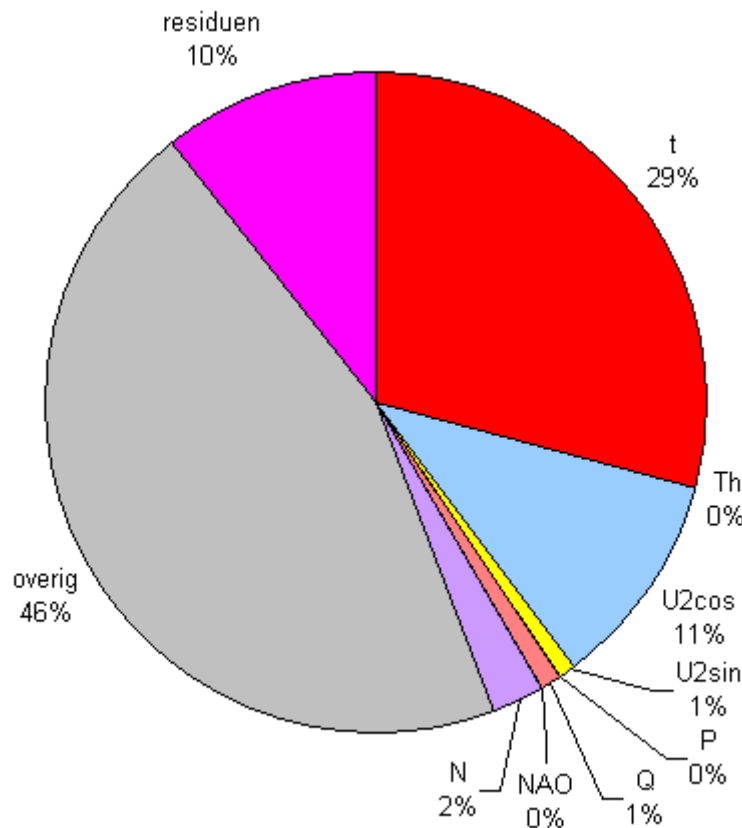
Tabel 5.1 De totale variantie SS_{TOT} (m^2), de verklaarde variantie SS_{EXP} en de fractie van de totale variantie die wordt verklaard $R^2 = SS_{EXP}/SS_{TOT}$.

Tabel 5.1 toont per station opnieuw de totale verklaarde variantie R^2 . In de andere kolommen wordt daarbij nu ook de onderverdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen uit vergelijking (2) gegeven. De laatste kolom geeft de verklaarde variantie die niet toegeschreven kan worden aan één specifieke variabele.

Station	R ²	t	T _H	N	U ² cos	U ² sin	P	NAO	Q	overig
Delfzijl	87,4%	28,2%	0,0%	1,9%	17,3%	0,5%	0,2%	0,0%	1,1%	38,1%
Harlingen	78,2%	12,4%	0,0%	2,9%	21,1%	0,3%	1,3%	0,0%	0,2%	40,0%
Den Helder	89,2%	21,7%	0,3%	1,9%	7,8%	2,2%	0,1%	0,1%	1,9%	53,2%
IJmuiden	90,4%	31,0%	0,0%	4,7%	9,1%	0,3%	0,0%	0,0%	1,1%	44,2%
Hoek van Holland	88,3%	32,2%	0,0%	1,1%	2,7%	1,2%	0,2%	0,0%	3,5%	47,4%
Vlissingen	89,0%	41,5%	0,0%	2,7%	7,3%	0,0%	0,9%	0,1%	0,4%	36,1%
Gemiddeld	89,6%	29,1%	0,0%	2,3%	10,7%	0,6%	0,0%	0,0%	1,3%	45,5%

Tabel 5.2 Totale verklaarde variantie R^2 en een verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen. De waarden in de laatste kolom geven de verklaarde variantie, die niet specifiek toegeschreven kon worden aan een individuele variabele.

Figuur 5.2 geeft een grafische weergave van de verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen voor het gemiddelde van de zes getijdestations.



Figuur 5.2 Verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen voor het gemiddelde van de zes getijdestations.

Conclusies

De volgende conclusies volgen uit de getallen in Tabel 5.2 en Tabel 5.3:

1. Met het model dat beschreven wordt met vergelijking (2) kan ongeveer 90% van de variantie van de jaargemiddelde waterstanden worden verklaard.
2. Ongeveer 45 tot 55% van de variantie wordt wel verklaard door het model, maar kon niet toegewezen worden aan één individuele variabele.
3. De onafhankelijke variabele 'tijd' verklaart de meeste variantie in de jaargemiddelde waterstanden. Dit gaat om de zeespiegelstijging zelf.
4. De wind verklaart na de tijd de meeste variantie. Bij de stations in de ondiepe Waddenzee (Delfzijl en Harlingen) verklaart de wind meer variantie dan bij de stations langs de Noordzee. Dit is gerelateerd aan negatieve relatie tussen waterdiepte en waterstandsopzet.
5. Gemiddeld over het jaar worden vrijwel alle getijconstituenten gelijk aan nul, waardoor het harmonisch getij nauwelijks variantie van de jaargemiddelde waterstanden verklaart.
6. De luchtdruk en de NAO lijken weinig meer toe te voegen als de wind reeds in het model aanwezig is. Deze drie variabelen zijn onderling sterk gecorreleerd (paragraaf 5.2).

7. De rivierafvoer verklaart 0 tot 3,5% variantie, met een maximum bij Hoek van Holland. Dit maximum is niet verrassend, maar de door de afvoer van de Rijn verklaarde variantie bij bijvoorbeeld Delfzijl is fysisch gezien merkwaardig. Er kan sprake zijn van een confounder, een derde variabele (bijvoorbeeld tijd) die zowel met de rivierafvoer als met de waterstand correleert. Een andere mogelijkheid is dat er een correlatie is tussen de Rijnafvoer en de afvoer van water door het Eems-Dollard estuarium.

5.3.3 Regressiecoëfficiënten

Methode

De regressiecoëfficiënten uit vergelijking (2) zijn evenals in hoofdstuk 4 bepaald met behulp van meervoudige lineaire regressie.

Resultaten

Tabel 5.3 toont per station het nulpunt en de regressiecoëfficiënten van het model, dat beschreven wordt met vergelijking (2).

Station	nulpunt	t	T _H	N ampl	N fase	U ² cos	U ² sin	P	NAO	Q
Vergelijking (2)	c0	c1	c2	*	*	c5	c6	c7	c8	c9
Dimensie	m	m/jaar	-	m	rad	s ² /m	s ² /m	m/hPa	-	s/m ²
Delfzijl	-8,27	2,8E-3	-2,53	0,012	1,41	6,9E-3	-1,5E-3	2,6E-3	-1,8E-4	1,8E-5
Harlingen	2,37	1,7E-3	-1,94	0,013	0,58	6,4E-3	-1,1E-3	-5,7E-3	2,4E-4	6,3E-6
Den Helder	-5,76	2,2E-3	6,20	0,010	0,99	3,8E-3	-2,9E-3	1,2E-3	-3,3E-3	2,2E-5
IJmuiden	-6,28	2,9E-3	0,79	0,018	1,36	4,6E-3	-1,2E-3	4,5E-4	8,8E-4	1,8E-5
Hoek van Holland	-7,92	2,8E-3	2,32	0,008	1,21	2,5E-3	-2,1E-3	2,3E-3	-2,4E-3	3,0E-5
Vlissingen	-1,33	2,9E-3	-0,16	0,012	0,73	3,9E-3	-3,0E-4	-4,5E-3	-3,9E-3	9,3E-6
Gemiddeld	-4,58	2,6E-3	2,21	0,012	1,07	4,7E-3	-1,5E-3	-5,5E-4	-1,4E-3	1,7E-5

Tabel 5.3 Nulpunt van het model en regressiecoëfficiënten per variabele en per station.

Conclusies

De volgende conclusies volgen uit de getallen in Tabel 5.3:

1. Het nulpunt is de situatie waarbij alle onafhankelijke variabelen gelijk zijn aan nul (tijd = 0 jaar, luchtdruk = 0 hPa, enz.). Dit nulpunt varieert sterk, en heeft weinig fysische betekenis.
2. De regressiecoëfficiënt voor de tijd is de berekende zeespiegelstijging voor de periode 1970-2012. Deze varieert tussen de 17 en 29 cm/eeuw.
3. De regressiecoëfficiënt voor het harmonisch getij varieert zeer sterk. Eerder bleek al dat deze variabele geen variantie van de jaargemiddelde waterstanden verklaart. Uit deze combinatie blijkt dat het harmonisch getij geen waardevolle verklarende variabele is bij een model op basis van jaargemiddelden.
4. De amplitude en de fase van de nodale cyclus zijn geen regressiecoëfficiënten, maar afgeleide variabelen. Ze zijn berekend op basis van de regressiecoëfficiënten c3 en c4 via vergelijking (3). De berekende amplitude van de nodale cyclus varieert tussen 0,8 en 1,8 cm. Baart et al. 2012 geeft een amplitude van 1,2 +/- 0,92 cm voor de Nederlandse

kust voor de periode 1890-2008. De berekende orde van grootte is dus correct. Merk op dat de analyseperiode 1970-2012 relatief kort is voor het bepalen van een signaal met een periode van 18,6 jaar.

5. Uit de regressiecoëfficiënten voor de wind ($U^2\cos$ term) blijkt net als in paragraaf 5.3.2 dat de wind op de Waddenzee meer invloed heeft dan op de Noordzee. De dwarscomponent van de wind ($U^2\sin$) heeft een regressiecoëfficiënt die iets kleiner is dan de opzet veroorzakende component ($U^2\cos$). Het teken van beide componenten is tegengesteld, zoals uitgelegd in paragraaf 5.2.
6. De regressiecoëfficiënt voor de luchtdruk varieert zeer sterk. Eerder bleek al dat deze variabele geen variantie van de jaargemiddelde waterstanden verklaart. Uit deze combinatie blijkt dat de luchtdruk geen waardevolle verklarende variabele is bij een model op basis van jaargemiddelden.
7. De regressiecoëfficiënten voor de NAO zijn niet eenduidig positief of negatief.
8. De regressiecoëfficiënten voor de rivierafvoer zijn positief. Dit is kwalitatief gezien correct.

5.3.4 Beta-gewichten

Methode

De definitie en duiding van beta-gewichten is beschreven in paragraaf 4.3.4.

Resultaten

Tabel 5.4 toont per station en per variabele het beta-gewicht.

Station	t	T_H	N	$U^2\cos$	$U^2\sin$	P	NAO	Q
Delfzijl	0,69	-0,01	0,24	0,56	-0,13	0,06	0,00	0,16
Harlingen	0,46	-0,02	0,27	0,62	-0,10	-0,15	0,00	0,06
Den Helder	0,61	0,06	0,23	0,37	-0,25	0,03	-0,04	0,22
IJmuiden	0,73	0,01	0,37	0,40	-0,10	0,01	0,01	0,16
Hoek van Holland	0,74	0,02	0,18	0,22	-0,19	0,06	-0,03	0,29
Vlissingen	0,84	0,00	0,27	0,37	-0,03	-0,13	-0,05	0,10
Gemiddeld	0,71	0,01	0,26	0,44	-0,13	-0,01	-0,02	0,17

Tabel 5.4 Beta-gewichten per variabele en per station.

Conclusies

Opnieuw blijkt dat variaties in de wind en de tijd de sterkste bijdrage leveren aan de variatie van de jaargemiddelde waterstand. Variaties in het harmonisch getij, de luchtdruk en de NAO leveren nauwelijks een bijdrage aan de totale variatie van de waterstand.

5.3.5 Akaike Informatiecriterium

Methode

De definitie en duiding van beta-gewichten is beschreven in paragraaf 4.3.5.

Resultaten

Tabel 5.5 toont per station het AIC voor het totale model (vergelijking (2)), en geeft weer hoe het AIC verandert als een variabele wordt verwijderd. Een positieve verandering betekent dat het model slechter wordt door de verwijdering van de variabele. Een negatieve verandering betekent dat het model beter wordt.

Station	Totaal	t	T _H	N	U ² cos	U ² sin	P	NAO	Q
Delfzijl	-327	49	-2	2	35	0	-1	-2	2
Harlingen	-311	17	-2	1	27	-1	0	-2	-2
Den Helder	-342	45	-1	3	21	6	-2	-2	5
IJmuiden	-340	60	-2	13	27	-1	-2	-2	3
Hoek van Holland	-336	55	-2	0	7	2	-1	-2	9
Vlissingen	-345	65	-2	6	20	-2	1	-2	0
Gemiddeld	-344	55	-2	5	28	0	-2	-2	3

Tabel 5.5 AIC voor het totale model (tweede kolom) en verandering in AIC bij verwijdering van één variabele (overige kolommen).

Conclusies

Voor het gemiddelde van de stations langs de Nederlandse kust geeft het AIC de volgende volgorde van belangrijkheid aan in het geval van een model op basis van daggemiddelde waarden voor alle variabelen:

1. Tijd
2. Wind
3. Nodale cyclus
4. Rivierafvoer
5. Dwarscomponent van de wind
6. Luchtdruk
7. Harmonisch getij
8. NAO

De laatste vier variabelen uit deze lijst voegen volgens het AIC onvoldoende toe om de kwaliteit van het model te verbeteren.

5.3.6 Samenvatting en selectie van variabelen

Op basis van de resultaten en analyses uit bovenstaande paragrafen, komen we tot de volgende selectie van variabelen:

1. Tijd
2. Wind
3. Nodale cyclus

Tijd, wind en nodale cyclus zijn de essentiële modelcomponenten. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de verklaarde variantie, de stabiliteit van de regressiecoëfficiënten en het AIC. Luchtdruk, harmonisch getij en NAO voegen duidelijk niets toe aan een model met jaargemiddelde waterstanden. Dit geldt ook, zij het in mindere mate, voor de dwarscomponent van de wind.

De rivierafvoer kan statistisch gezien het model enigszins verbeteren. Fysisch gezien is een directe relatie tussen rivierafvoer en waterstand bij stations anders dan Hoek van Holland onrealistisch. Het vermoeden is dan ook dat er sprake is van een confounder, een derde variabele (bijvoorbeeld tijd) die zowel met de rivierafvoer als met de waterstand correleert. Dit blijkt ook uit de afname in R^2 van het model, wanneer de rivierafvoer uit het model wordt verwijderd. Het verschil in totale verklaarde variantie bedraagt slechts 1,3%. De niet aan een specifieke variabele toe te wijzen variantie neemt echter af van 45,5% naar 27,2%.

Station	R^2	t	T_H	N	$U^2 \cos$	$U^2 \sin$	P	NAO	Q	overig
Gemiddeld	89,6%	29,1%	0,0%	2,3%	10,7%	0,6%	0,0%	0,0%	1,3%	45,5%
Gemiddeld	88,2%	37,7%	0,0%	6,0%	16,1%	0,5%	0,8%	0,0%	x	27,2%

Tabel 5.6 Verandering in verklaarde variantie bij verwijdering van de rivierafvoer uit het model voor de gemiddelde waterstanden over de zes getijdestations.

De conclusie is dat de rivierafvoer fungeert als confounder, die op zichzelf weinig aan het model toevoegt. Voor Hoek van Holland zou mogelijk een uitzondering gemaakt kunnen worden, maar vooralsnog kiezen we voor één model voor de gehele kust.

Het gereduceerde model is te beschrijven met de volgende vergelijking:

$$H = c_0 + c_1 t + c_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_3 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) + c_4 U^2 \cos \delta \quad (3)$$

De waarde van de regressiecoëfficiënten in Tabel 5.3 is niet meer van toepassing na het verwijderen van enkele modelcomponenten. De coëfficiënten die van toepassing zijn op het model van vergelijking (3) zijn opgenomen in Tabel 5.7.

Station	nulpunt	t			N ampl	N fase	$U^2 \cos$
Vergelijking (3)	c0	c1	2,5%	97,5%	*	*	c4
Dimensie	m	cm/eeuw			m	rad	s ² /m
Delfzijl	-6,09	30,7	25,4	36,0	0,018	1,48	8,2E-3
Harlingen	-3,79	18,9	12,7	25,2	0,014	1,06	7,5E-3
Den Helder	-5,47	27,1	22,2	32,0	0,019	1,38	5,8E-3
IJmuiden	-6,24	31,2	26,6	35,7	0,025	1,46	5,8E-3
Hoek van Holland	-6,37	32,2	26,8	37,6	0,019	1,48	4,6E-3
Vlissingen	-6,09	30,4	25,8	34,9	0,015	1,16	4,6E-3
Gemiddeld	-5,66	28,3	23,8	32,8	0,018	1,36	6,1E-3

Tabel 5.7 Nulpunt van vergelijking (3) en regressiecoëfficiënten per variabele en per station.

Door het verwijderen van variabelen uit het totale model verschuiven ook de percentages met verklaarde variantie per variabele. Dit gedrag wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van correlaties tussen de variabelen. De totale verklaarde variantie R^2 en de verklaarde variantie per variabele van het gereduceerde model zijn opgenomen in Tabel 5.8. In paragraaf 4.3.2 is reeds gemeld dat de verklaarde variantie per variabele bij een type III ANOVA niet noodzakelijkerwijs optelt tot de totale verklaarde variantie. In dit geval zorgt dat ervoor dat de som van de bijdragen van de componenten groter is dan de totale verklaarde variantie.

Dit resulteert in negatieve waarden in de kolom overig. Blijkbaar is er voor dit model overlap tussen de verklaarde variantie door de verschillende variabelen.

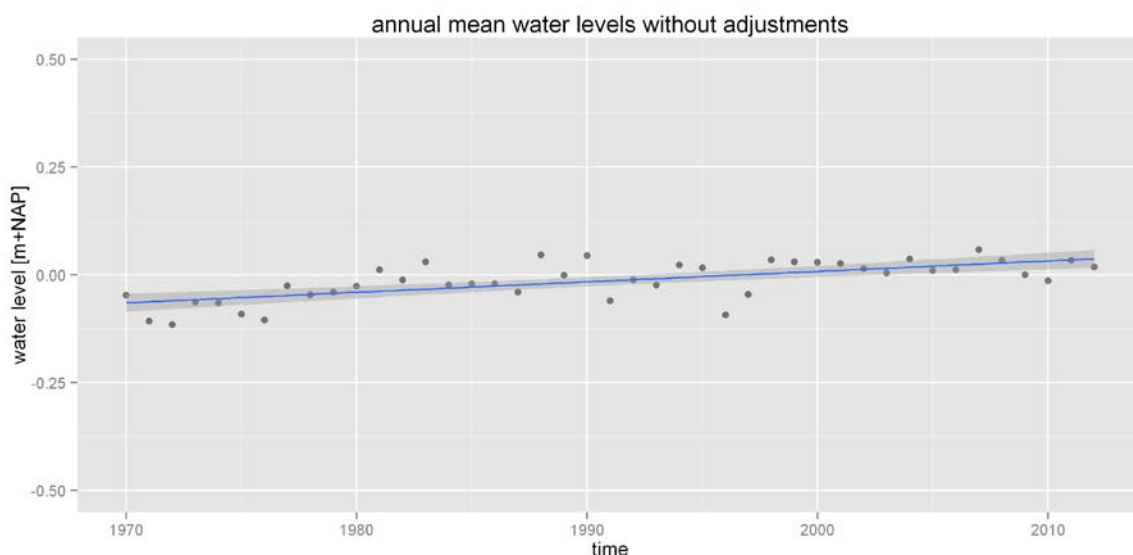
Station	R ²	t	N	U ² cos	overig
Delfzijl	85,4%	52,5%	6,9%	41,3%	-15,3%
Harlingen	74,5%	25,1%	5,0%	49,7%	-5,3%
Den Helder	84,2%	52,4%	8,8%	29,9%	-6,8%
IJmuiden	88,4%	58,1%	13,3%	24,8%	-7,7%
Hoek van Holland	82,8%	66,5%	8,7%	15,2%	-7,5%
Vlissingen	85,8%	68,9%	5,9%	17,3%	-6,3%
Gemiddeld	86,7%	57,0%	8,3%	30,8%	-9,4%

Tabel 5.8 Totale verklaarde variantie R² en een verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende componenten van vergelijking (3). De negatieve waarden in de laatste kolom geven de overlap in verklaarde variantie tussen de afzonderlijke variabelen.

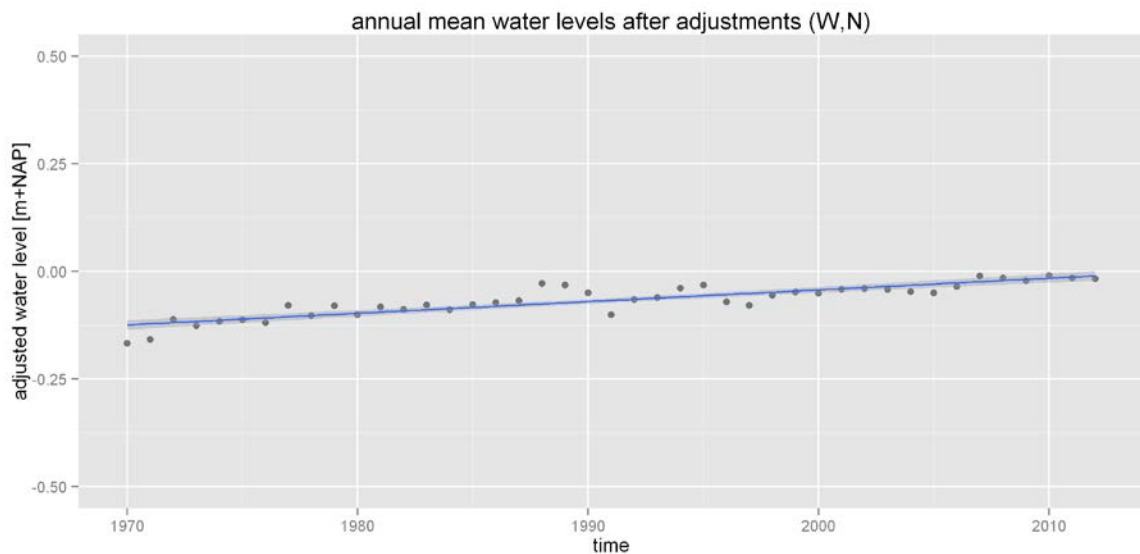
5.4 Grafische weergave reproductie waterstanden

Het effect van het toevoegen van de variabelen wind en nodale cyclus wordt duidelijk zichtbaar als Figuur 5.4 vergeleken wordt met Figuur 5.3. Figuur 5.3 toont de gemeten jaargemiddelde waterstanden bij Den Helder, inclusief een lineaire trend. Figuur 5.4 toont hetzelfde, maar hier zijn de waterstanden eerst gecorrigeerd voor het effect van wind en nodale cyclus voordat de jaargemiddelden zijn berekend. De correcties zijn uitgevoerd op basis van de regressiecoëfficiënten in Tabel 5.7.

Bij de andere stations is een zelfde beeld zichtbaar. In bijlage E zijn deze figuren voor alle beschouwde stations opgenomen.



Figuur 5.3 Jaargemiddelde waterstanden bij Den Helder.



Figuur 5.4 Gecorrigeerde jaargemiddelde waterstanden bij Den Helder. Correcties zijn toegepast voor wind (W) en de nodale cyclus (N).

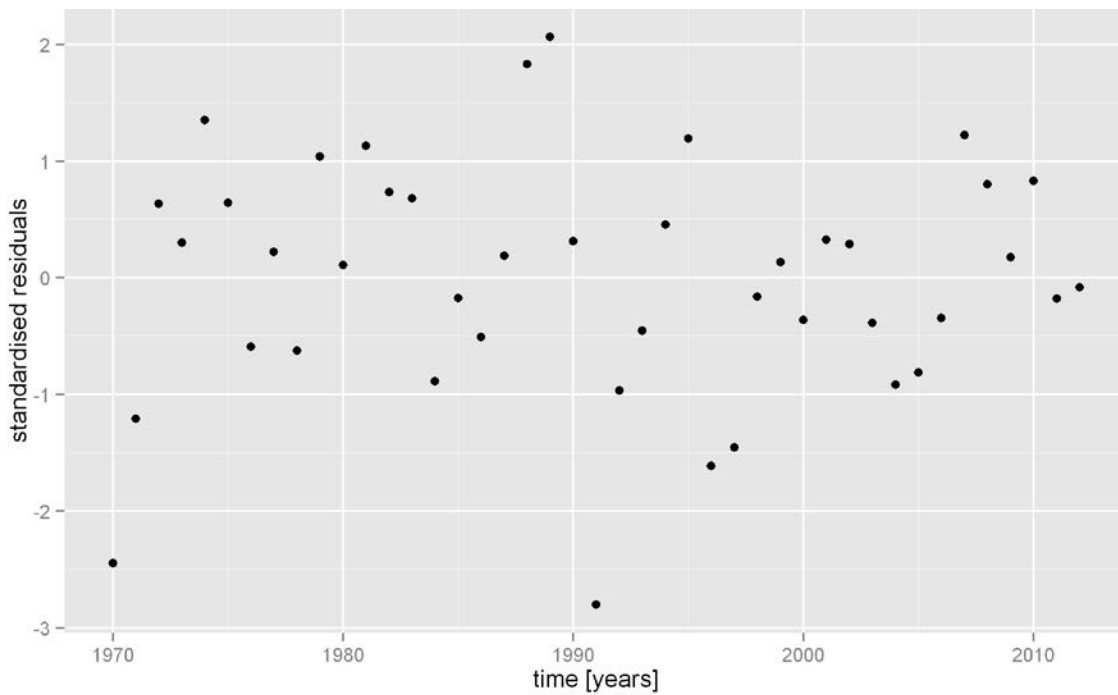
5.4.1 Controle residuen

Om de toepasbaarheid van een lineair model met een lineaire trend in de tijd te controleren, is een controle uitgevoerd van de residuen. De residuen zijn gelijk aan het verschil tussen de gemeten waterstand (de observaties) en de door het model berekende waterstand (de predicties).

Er zijn drie controles uitgevoerd. Zie paragraaf 4.5 voor een beschrijving.

Residuen als functie van de tijd

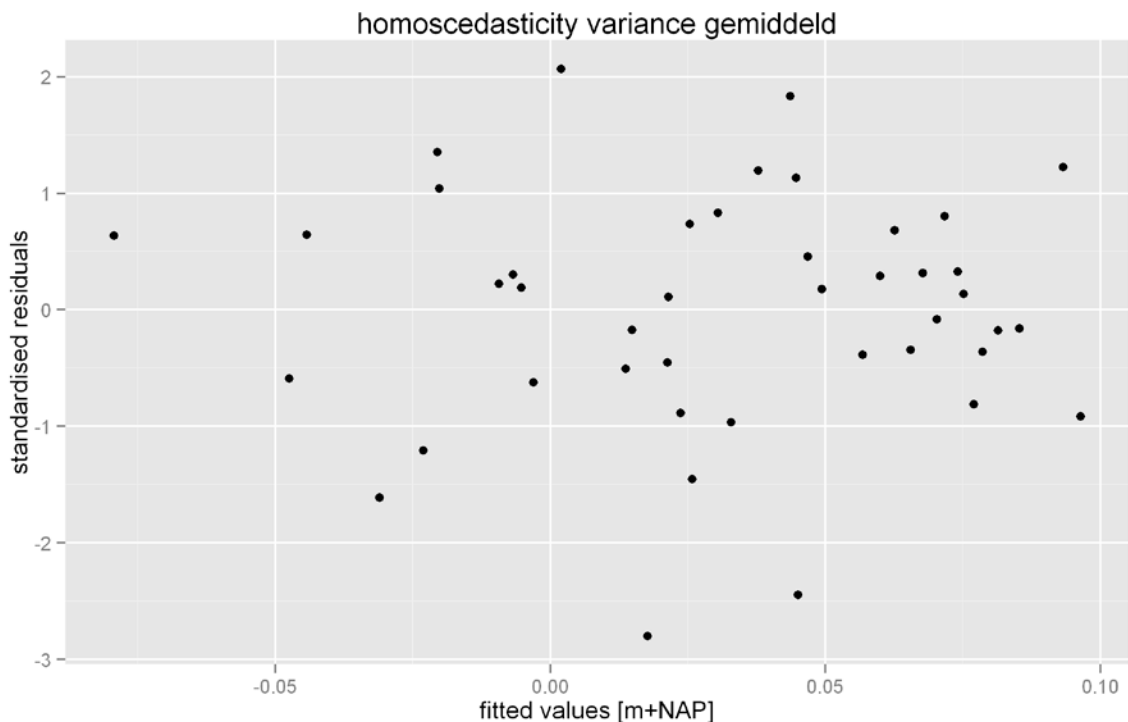
Figuur 5.5 toont de gestandaardiseerde residuen als functie van de tijd voor het gemiddelde van de zes stations. Visuele inspectie leidt tot de conclusie dat er geen significante verandering zichtbaar is. Een lineaire trend in de tijd lijkt dus van toepassing te zijn. Dit is ook het geval voor de individuele zes stations. Vergelijking van de lineaire trend met de uitkomsten van lokale regressie (paragraaf 5.5) geeft hier aanvullend inzicht in.



Figuur 5.5 Gestandaardiseerde residuen als functie van de tijd voor het gemiddelde van de zes stations.

5.4.2 Homoscedasticiteit

Figuur 5.5 toont de gestandaardiseerde residuen als functie van de afhankelijke variabele (de waterstand) voor het gemiddelde van de zes stations. Er is op basis van visuele inspectie geen structurele trend zichtbaar.



Figuur 5.6 Gestandaardiseerde residuen als functie van de berekende afhankelijke variabele (de waterstand in m+NAP) voor het gemiddelde van de zes stations.

5.4.3 Autoregressie

Om de afhankelijkheid van opeenvolgende residuen te onderzoeken, is de Augmented Dickey–Fuller test (ADF) toegepast. Deze test vergelijkt de residuen van opeenvolgende jaren, en onderzoekt of er sprake is van significante autoregressie. Dit bleek voor alle stations niet het geval te zijn.

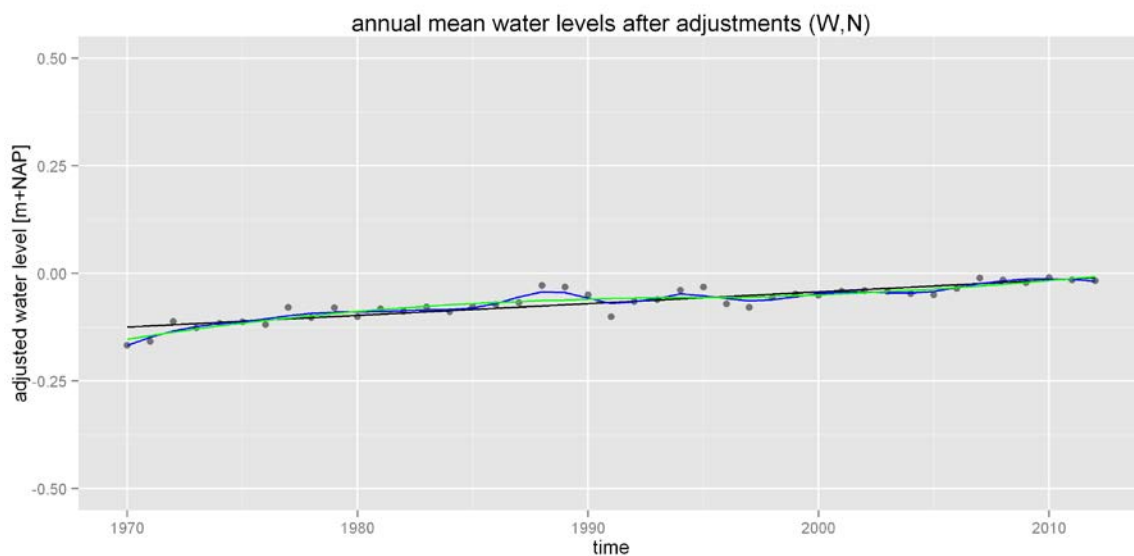
5.5 Lokale regressie

In paragraaf 4.6 is beschreven wat het principe is van lokale regressie.

Figuur 5.7 toont hetzelfde als Figuur 5.6, alleen met lokale regressie in plaats van lineaire regressie. Er is gebruik gemaakt van een bandbreedte van 0,25 (blauwe lijn) en 0,75 (groene lijn). In bijlage E zijn dergelijke figuren voor de andere stations opgenomen.

De lineaire trendlijn en de regressiefunctie met een bandbreedte van 0,75 komen sterk overeen. Tussen 1970 en 1980 ligt het resultaat van de lokale regressie iets onder de lineaire trendlijn, tussen 1970 en 1995 iets erboven, en vanaf 1995 vallen ze ongeveer samen.

Bij de andere stations liggen het resultaat van de lokale regressie en de lineaire trendlijn overwegend nog wat dicht bij elkaar. Zie bijlage E. Gemiddeld langs de kust zijn de afwijkingen tussen beide klein.



Figuur 5.7 Jaargemiddelde waarden van de gecorrigeerde waterstanden bij Den Helder. Correcties zijn toegepast voor wind (W) en de nodale cyclus (N). Vervolgens is een regressielijn bepaald met de LOESS methode met bandbreedte 0,25 (blauw) of 0,75 (groen). De lineaire trendlijn is ter vergelijking in zwart weergegeven.

6 Vergelijking modellen

In dit hoofdstuk worden eerst de modellen uit de voorgaande twee hoofdstukken met elkaar vergeleken. Vervolgens worden de resultaten van de twee nieuw ontwikkelde modellen naast de oorspronkelijke methode gelegd.

6.1 Daggemiddelden versus jaargemiddelden

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen het ontwikkelde model op basis van daggemiddelden (hoofdstuk 4) en het ontwikkelde model op basis van jaargemiddelden (hoofdstuk 5).

6.1.1 Berekenende zeespiegelstijging

Onderstaande tabel toont de zeespiegelstijging in cm/eeuw, berekend op basis van daggemiddelde of jaargemiddelde waterstanden in de periode 1970-2012. Vergelijking (7) geeft het model voor de daggemiddelden, vergelijking (3) beschrijft het model voor de berekening van zeespiegelstijging op basis van jaargemiddelden. Ook het 95% betrouwbaarheidsinterval is weergegeven. Vanwege het grote verschil in aantal observaties, zegt het verschil in grootte van het interval tussen beide modellen niets over een eventueel verschil in kwaliteit.

Station	nieuw model, daggemiddelden			nieuw model, jaargemiddelden		
	z.s.s.	2,5%	97,5%	z.s.s.	2,5%	97,5%
Delfzijl	29,8	27,9	31,7	30,7	25,4	36,0
Harlingen	18,1	16,5	19,7	18,9	12,7	25,2
Den Helder	26,4	25,0	27,8	27,1	22,2	32,0
IJmuiden	30,8	29,3	32,2	31,2	26,6	35,7
Hoek van Holland	31,7	30,4	33,1	32,2	26,8	37,6
Vlissingen	29,5	28,1	30,8	30,4	25,8	34,9
Gemiddeld	27,7	26,2	29,1	28,3	23,8	32,8

Tabel 6.1 Vergelijking tussen de zeespiegelstijging in cm/eeuw voor de periode 1970-2012, zoals berekend op basis van daggemiddelden met vergelijking (7) en op basis van jaargemiddelden met vergelijking (3).

Uit de vergelijking blijkt dat de verschillen tussen de stations op hoofdlijnen hetzelfde zijn. De resultaten van de methode op basis van daggemiddelden liggen echter structureel ongeveer 0,5 cm/eeuw lager dan op basis van jaargemiddelden.

Behalve het verschil in middelingsperiode is er ook een verschil in de in het model opgenomen verklarende variabelen aanwezig. Ten opzichte van het model met jaargemiddelden zijn in het model met daggemiddelden de variabelen harmonisch getij en luchtdruk toegevoegd. Een eventuele trend in één van deze variabelen heeft invloed op de berekende zeespiegelstijging.

Tabel 6.2 toont voor beide modellen de trends in de verklarende parameters, en hoe deze trends doorwerken in de berekende zeespiegelstijging. In totaal resulteren de trends in de drie variabelen in het model met daggemiddelden tot een bijdrage van $-3,1$ cm/eeuw. De trend in de jaargemiddelde waarden voor de windopzet in het model met jaargemiddelden resulteert in een bijdrage van $-4,3$ cm/eeuw.

Een gedeelte van de totale zeespiegelstijging wordt in het model verklaard door de variabelen wind en luchtdruk, dit leidt dus tot een afname van de overblijvende eigenlijke zeespiegelstijging. De eigenlijke zeespiegelstijging (onafhankelijk van veranderingen in wind, luchtdruk of getij) is dus groter dan de waarde die volgt uit een eenvoudige trendlijn door de gemeten waterstanden. Deze conclusie is een resultaat op zichzelf, en komt nader aan de orde in paragraaf 6.2. Omdat dit effect sterker is bij jaargemiddelde dan bij daggemiddelde waterstanden, valt de berekende zeespiegelstijging bij alle stations hoger uit bij berekening met jaargemiddelde waterstanden. Het verschil is dus (kwalitatief) verklaarbaar.

Variabele	Daggemiddelden			Jaargemiddelden		
	Trend	Regr.coef.	Bijdrage zss	Trend	Regr.coef.	Bijdrage zss
$U^2\cos$	$-6,8e-2$ $m^2/s^2/jaar$	$5,3e-3$ s^2/m	$-3,6$ cm/eeuw	$-7,0e-2$ $m^2/s^2/jaar$	$6,1e-3$ s^2/m	$-4,3$ cm/eeuw
T_H	$8,4e-5$ m/jaar	$0,74$ [-]	$+0,6$ cm/eeuw	n.v.t.		
P	$1,4e-3$ hPa/jaar	$-7,6e-3$ m/hPa	$-0,1$ cm/eeuw			

Tabel 6.2 Bijdrage van trends in verklarende variabelen aan de geobserveerde zeespiegelstijging voor het gemiddelde van de zes getijdestations over de periode 1970-2012.

6.1.2 Verklaarde variantie

Met het model op basis van dagwaarden is het beter mogelijk om onderscheid te maken tussen de bijdragen van de verschillende variabelen aan de waargenomen variaties in de waterstand. Tabel 6.3 toont de laatste rij van Tabel 4.3 en Tabel 5.2. Bij daggemiddelden was voor het totale model voor 15,0 procent van de verklaarde variantie niet duidelijk aan welke variabele dit toegeschreven moest worden. Bij jaargemiddelden was dit 45,5 procent, meer dan de helft van de in totaal verklaarde variantie R^2 .

De reden is dat in de daggemiddelde data veel meer tijdschalen zichtbaar zijn. De tijdschaal van de zeespiegelstijging (orde van jaren) is bijvoorbeeld veel groter dan de tijdschaal van de wind (orde van dagen). De tijdschaal van de rivierafvoer zit daar weer tussenin (orde van weken).

Een voorbeeld. Relatief snelle fluctuaties in de windsnelheid vallen samen met fluctuaties in de waterstand. Op basis van de correlatie tussen deze fluctuaties kan de regressiecoëfficiënt voor de wind ($U^2\cos$ -term) goed worden ingeschat. De wind neemt daarnaast ook op lange termijn af ($-0,068$ $m^2/s^2/jaar$, Tabel 6.2). De reeds gevonden regressiecoëfficiënt voor de wind is ook van toepassing op de verandering op lange termijn. Hierdoor is het goed mogelijk om onderscheid te maken tussen de verandering in de waterstand die gerelateerd is aan geleidelijke verandering van de windsnelheid en de invloed van de mondiale zeespiegelstijging.

Bij jaargemiddelden worden de snellere fluctuaties in wind en waterstand uitgemiddeld. Het is daarom moeilijker om onderscheid te maken tussen de bijdrage van mondiale

zeespiegelstijging ('de tijd') en een veranderende wind. Het probleem van confounding (de aanwezigheid van een derde variabele, die zowel met een onafhankelijke variabele als met de afhankelijke variabele, de waterstand, correleert) is dan ook meer aan de orde bij jaargemiddelden dan bij daggemiddelden.

Station	R^2	t	T_H	N	$U^2 \cos$	$U^2 \sin$	P	NAO	Q	overig
Daggemiddelden										
Gemiddelde 6 stations	79,5%	2,1%	4,9%	0,2%	46,2%	0,7%	10,4%	0,1%	0,0%	15,0%
Jaargemiddelden										
Gemiddelde 6 stations	89,6%	29,1%	0,0%	2,3%	10,7%	0,6%	0,0%	0,0%	1,3%	45,5%

Tabel 6.3 Totale verklaarde variantie R^2 en een verdeling van de verklaarde variantie over de verschillende variabelen voor het gemiddelde van de zes stations in het geval van daggemiddelden (Tabel 4.3) en in het geval van jaargemiddelden (Tabel 5.2).

6.1.3 Voordelen en nadelen

In deze paragraaf volgen enkele overwegingen die relevant zijn bij de keuze tussen een model op basis van daggemiddelde of jaargemiddelde waterstanden.

1. Door een gemiddelde te nemen, wordt data met een hoge resolutie gereduceerd tot data met een lage resolutie. Hierbij gaat veel informatie verloren. Dit negatieve effect van middeling is sterker bij een model op basis van jaargemiddelden dan op basis van daggemiddelden.
2. Bij een model op basis van hoogfrequente data is het goed mogelijk dat opeenvolgende waarden gecorreleerd zijn. Bij een sterke correlatie is een autoregressief model meer op zijn plaats dan een trendmodel. Uit de Augmented Dickey Fuller test bleek echter dat ook het model op basis van dagwaarden geen autoregressief karakter kent (paragraaf 4.5.3).
3. Verschillende verklarende variabelen zijn onderling gecorreleerd. Eén van de typen informatie die verloren gaat bij gebruik van jaargemiddelden (eerste overweging uit deze lijst) is informatie over de kortere tijdschalen. Dit zorgt ervoor dat het moeilijk is om te bepalen welke processen verantwoordelijk zijn voor de geobserveerde variatie in de waterstand. Het probleem van confounding is dan ook meer aan de orde bij een model op basis van jaargemiddelden dan bij een model op basis van daggemiddelden (paragraaf 6.1.2).
4. Jaargemiddelde waterstanden zijn voor een langere periode beschikbaar dan daggemiddelde waterstanden.

6.2 Verschil met oorspronkelijke methode

In deze paragraaf worden drie modellen met elkaar vergeleken:

1. De oorspronkelijke methode: lineaire regressie door jaargemiddelde waterstanden, met inbegrip van de 18,6-jarige nodale cyclus (paragraaf 1.2 en 2.2).
2. Het nieuw ontwikkelde model op basis van daggemiddelde waterstanden en verklarende variabelen harmonisch getij, wind, luchtdruk en nodale cyclus (vergelijking 7 in H4).
3. Het nieuw ontwikkelde model op basis van jaargemiddelde waterstanden en verklarende variabelen wind en nodale cyclus (vergelijking 3 in H5).

Tabel 6.4 toont de berekende zeespiegelstijging, zoals die volgt uit een analyse van de waterstanden tussen 1970 en 2012 met de bovenstaande drie modellen. Ook het 95% betrouwbaarheidsinterval en de verklaarde variantie R^2 is weergegeven. Het gegeven dat het interval voor het tweede model veruit het kleinst is, is het gevolg van de veel grotere hoeveelheid data die bij de regressie is betrokken.

Station	oorspronkelijk model, jaargemiddelden				nieuw model, daggemiddelden				nieuw model, jaargemiddelden			
	z.s.s.	2,5%	97,5%	R^2	z.s.s.	2,5%	97,5%	R^2	z.s.s.	2,5%	97,5%	R^2
Delfzijl	23,4	13,6	33,3	44%	29,8	27,9	31,7	76%	30,7	25,4	36,0	85%
Harlingen	13,6	3,2	24,0	25%	18,1	16,5	19,7	83%	18,9	12,7	25,2	75%
Den Helder	23,2	15,2	31,3	54%	26,4	25,0	27,8	80%	27,1	22,2	32,0	84%
IJmuiden	26,8	19,0	34,6	64%	30,8	29,3	32,2	79%	31,2	26,6	35,7	88%
Hoek van Holland	28,1	21,1	35,1	68%	31,7	30,4	33,1	76%	32,2	26,8	37,6	83%
Vlissingen	26,2	19,8	32,6	69%	29,5	28,1	30,8	74%	30,4	25,8	34,9	86%
Gemiddeld	23,6	15,7	31,4	56%	27,7	26,2	29,1	79%	28,3	23,8	32,8	87%

Tabel 6.4 Berekende zeespiegelstijging in cm/eeuw en verklaarde variantie R^2 op basis van 1970-2012 met (1) de oorspronkelijke methode, (2) het nieuw ontwikkelde model met daggemiddelde waterstanden en (3) het nieuw ontwikkelde model met jaargemiddelde waterstanden.

Het opvallendste resultaat is dat met de oorspronkelijke methode op basis van 1970-2012 een aanzienlijk lagere zeespiegelstijging wordt berekend dan met beide nieuw ontwikkelde modellen. Het verschil voor het gemiddelde van de zes getijdestations bedraagt 4,1 cm/eeuw (nieuw model met daggemiddelden) of 4,7 cm/eeuw (nieuw model met jaargemiddelden).

Dit verschil is voornamelijk het gevolg van het toevoegen van verklarende variabelen. Het is dan mogelijk om onderscheid te maken tussen:

1. de veranderende zeespiegel die niet samenhangt met wind, getij en luchtdruk (zeespiegel_z),
2. de veranderende zeespiegel alleen als gevolg van geleidelijke veranderingen in wind, getij en luchtdruk over de periode 1970-2012 (zeespiegel_{WGL}).

De veranderingen in de verklarende variabelen wind, getij en luchtdruk zijn reeds besproken in 6.1.1, en meer in het bijzonder in Tabel 6.2. Het voornaamste effect is de afname van de windsnelheid. Deze waarneming is in overeenstemming met recente literatuur, zoals Wang et al. (2009) en Bakker et al. (2012). Omdat de wind in Nederland voornamelijk uit de westelijke sector komt, leidt een afname van de gemiddelde windsnelheid tot lagere gemiddelde waterstanden langs de kust. De afname in de windsnelheid maskeert dus de werkelijke grootte van de eigenlijke zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

Verder is het volgende zichtbaar:

- De betrouwbaarheidsintervallen zijn kleiner bij het nieuwe model met jaargemiddelde waterstanden (gemiddeld over de zes stations $28,4 \pm 5,1$ cm/eeuw) dan bij het oorspronkelijke model zonder wind ($23,6 \pm 8,2$ cm/eeuw). Het enige verschil is het toevoegen van de wind als verklarende variabele.
- Een vergelijking met de betrouwbaarheidsintervallen van het model op basis van daggemiddelden met de modellen op basis van jaargemiddelden kan een vertekend beeld geven.

- Het oorspronkelijke model verklaart gemiddeld 56% van de variantie in de jaargemiddelde waterstanden. Het toevoegen van de wind als verklarende variabele laat dit percentage toenemen tot 87%.

6.3 Eerste toepassing op lange tijdreeksen

In de huidige methode ter bepaling van de zeespiegelstijging worden de jaargemiddelde waterstanden vanaf 1890 gebruikt (Deltares, 2010). Om een idee te krijgen van de uitkomsten van de twee nieuw ontwikkelde modellen op tijdreeksen met een vergelijkbare lengte, is de periode 1906-2012 beschouwd. In Tabel 6.5 staan de uitkomsten voor Delfzijl en Vlissingen gegeven. De resultaten voor de andere stations zijn vergelijkbaar.

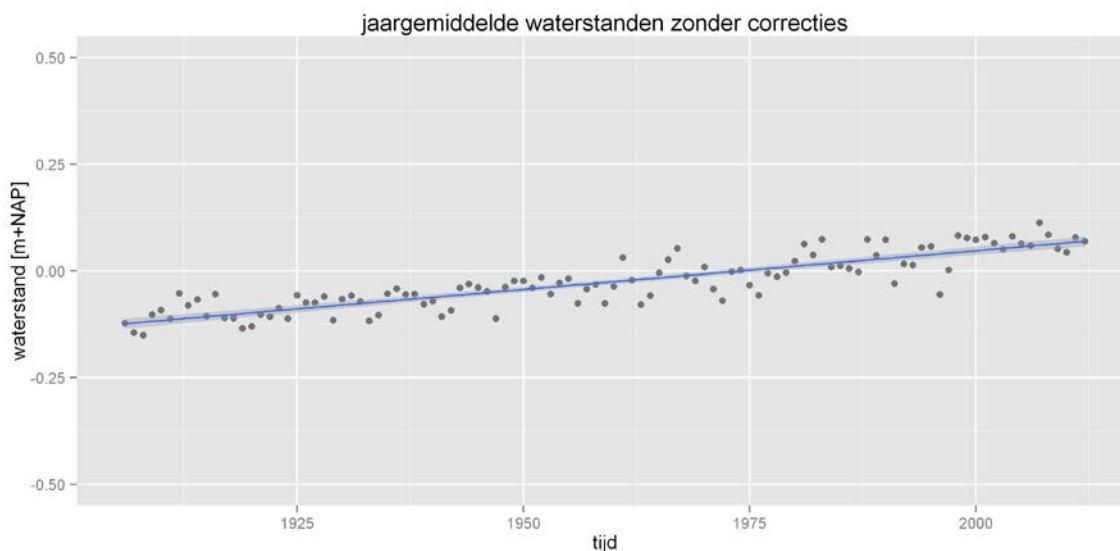
In de periode 1906-2012 is (op een hiaat in de Tweede Wereldoorlog na) data bij het KNMI-station De Kooy beschikbaar voor zowel luchtdruk als windcondities. Het hiaat is voor zowel de wind (de opzet-veroorzakende component van de kwadratische windsnelheid) en de luchtdruk gevuld met het gemiddelde van de betreffende tijdreeksen.

Het berekende harmonisch getij (relevant voor het model op basis van daggemiddelde waarden) is pas vanaf 1970 beschikbaar. Voor de data in de jaren vóór 1970 is de gemiddelde waarde over 1970-2012 (is nagenoeg nul) aangehouden voor het harmonisch getij.

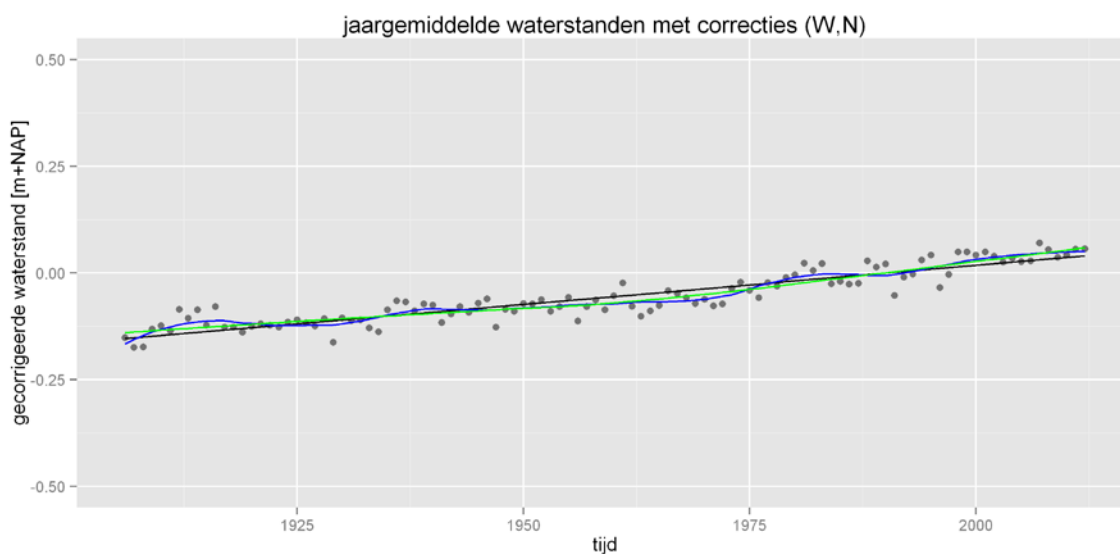
De singuliere tijdreeksen, waarmee daggemiddelde waterstanden kunnen worden bepaald, starten niet allemaal vóór 1906 (zie Tabel 3.1). De tijdreeks bij IJmuiden start wel in 1900, maar kent een groot hiaat. De figuren voor de combinatie van de 6 stations zijn ter illustratie toegevoegd aan deze paragraaf.

Station	oorspronkelijk model, jaargemiddelden				nieuw model, daggemiddelden				nieuw model, jaargemiddelden			
	z.s.s.	2,5%	97,5%	R ²	z.s.s.	2,5%	97,5%	R ²	z.s.s.	2,5%	97,5%	R ²
Delfzijl	18,6	16,3	21,0	72%	18,8	18,2	19,3	67%	18,6	16,6	20,7	78%
Vlissingen	20,2	18,5	21,8	85%	21,2	20,7	21,6	66%	20,2	18,7	21,7	88%

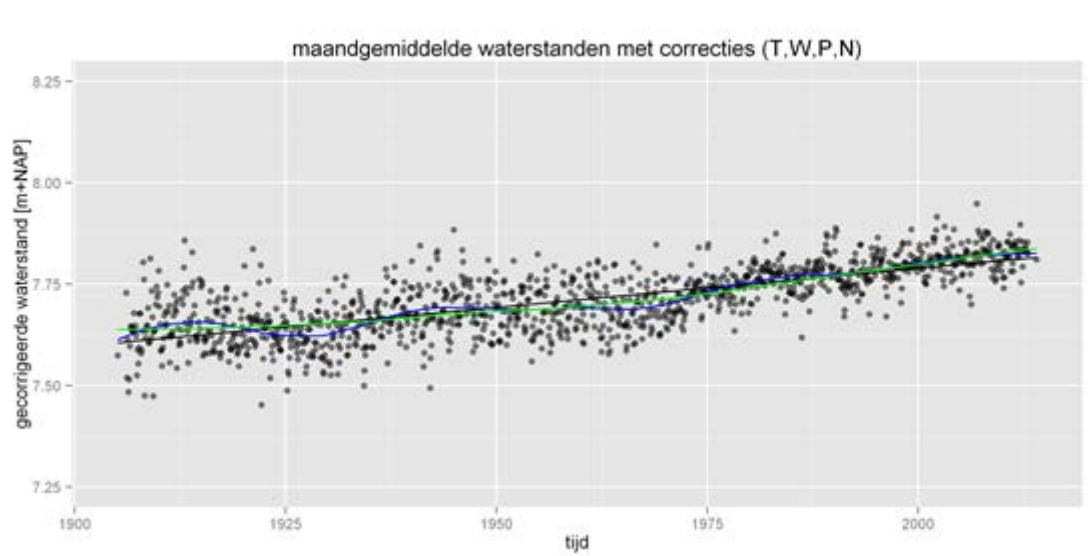
Tabel 6.5 Berekende zeespiegelstijging in cm/eeuw en verklaarde variantie R² op basis van 1906-2012 met (1) de oorspronkelijke methode, (2) het nieuw ontwikkelde model met daggemiddelde waterstanden en (3) het nieuw ontwikkelde model met jaargemiddelde waterstanden.



Figuur 6.1 Jaargemiddelde waterstanden (combinatie 6 stations) voor de periode 1906-2012.



Figuur 6.2 Jaargemiddelde waarden van de gecorrigeerde waterstanden (combinatie 6 stations) voor de periode 1906-2012. Correcties zijn toegepast voor wind (W) en de nodale cyclus (N). Vervolgens is een regressielijn bepaald met de LOESS methode met bandbreedte 0,25 (blauw) of 0,75 (groen). De lineaire trendlijn is in zwart weergegeven.



Figuur 6.3 Maandgemiddelde waarden van de gecorrigeerde daggemiddelde waterstanden (combinatie 6 stations). Correcties zijn toegepast voor harmonisch getij (T), wind (W), luchtdruk (P) en de nodale cyclus (N). Vervolgens is een regressielijn bepaald met de LOESS methode met bandbreedte 0,25 (blauw) of 0,75 (groen). De lineaire trendlijn is in zwart weergegeven.

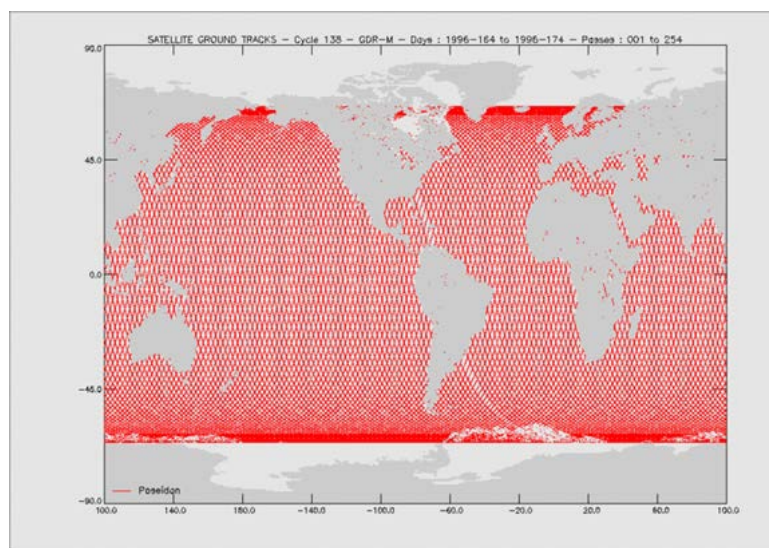
7 Trends in zeespiegelstijging uit satelliet altimetrie voor het Noordzeegebied

7.1 Onderzoeksvraag

Voor het langjarig inplannen en begroten van zandsuppleties langs de Nederlandse kust is het noodzakelijk een goed beeld te hebben van de langjarige zeespiegelstijging. Tot nu toe worden de zandsuppleties bepaald aan de hand van de gemeten stijging langs zes hoofdstations aan de Nederlandse kust (Deltares, 2010). In dit deelonderzoek wordt geïnventariseerd of satellietmetingen van de zeehoogte (altimetrie), waarvan inmiddels een twintigjarige meetreeks beschikbaar is, nuttige aanvullende informatie kunnen verschaffen over de trends in zeeniveau. Daartoe worden deze twintigjarige trends op de Noordzee vergeleken met die langs de kust en worden de correlaties tussen de fluctuaties in beide meetreeksen geanalyseerd.

7.2 Gebruikte data

De gebruikte altimetriedata zijn de Ssalto/Duacs Gridded Sea level anomalies van AVISO geïnterpoleerd op een $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ rooster (www.aviso.oceanobs.com). Er is gebruik gemaakt van de Delayed Time Updated gegevens, waarin de metingen van meerdere tegelijkertijd vliegende satellieten gecombineerd zijn voor een zo compleet mogelijk beeld. Topex/Poseidon, Jason-1 en Jason-2 zijn de belangrijkste satellieten in de database, omdat ze sinds oktober 1992 een meetreeks leveren met een vast herhalingspatroon van bijna 10 dagen (Fig. 8.1). Deze meetgegevens zijn aangevuld met die van de ERS, ENVISAT en GFO satellieten. De AVISO data worden aangeleverd met een tijdsinterval van een week. Omdat we hier geïnteresseerd zijn in de lange termijn veranderingen zijn daarvan eerst maandgemiddelden gemaakt. De geïnterpoleerde altimetrie-gegevens zijn beschikbaar voor oktober 1992 tot en met april 2013. Alle analyses zijn gedaan over de periode 1 januari 1993 tot en met 31 december 2012. Vanwege de sterke seizoenscyclus zou het meenemen van onvolledige jaren leiden tot sterke afwijkingen.



Figuur 7.1: Banenpatroon van Topex/Poseidon, Jason-1 en Jason-2

7.3 Resultaten

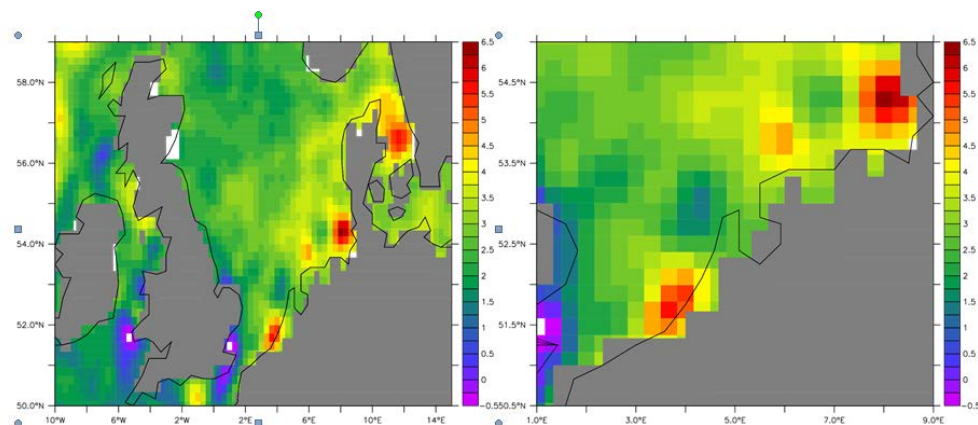
Het door de satellieten gemeten zeeniveau in de Noordzee varieert sterk van jaar tot jaar (zie paragraaf 7.5). Er zijn grootschalige variaties te zien maar ook kleinschalige maxima en minima in de buurt van de kust, met name in het Kanaalgebied. Ook de getijdestations laten regionale variaties zien (Deltares, 2010). In het onderstaande wordt onderzocht of deze overeen komen. Het is ook mogelijk dat de variaties (deels) een artefact zijn waarbij het getijdesignaal in die regio's niet adequaat is weggefilterd.

7.3.1 Gemiddelde trends

De gemiddelde trend over 1993–2012 is weergegeven in Figuur 7.2, voor het hele Noordzee-gebied en ingezoomd op de Nederlandse kust. De altimetriegegevens lijken waarden te hebben binnen de kustlijn. Dit is uiteraard geen gemeten zeeniveau maar een gevolg van de gebruikte interpolatietechnieken. In het noordelijk deel van de Noordzee bedraagt de gemiddelde trend 2.5 mm/jr, in de buurt van de Nederlandse kust is de trend iets groter (Tabel 7.1).

regio		trend in zeeniveau
noord	55.5°N-58°N, 2°W-8°E	2.5 mm/jr
midden	53°N-55.5°N, 2°W-8°E	3.0 mm/jr
zuid	51°N-53°N, 2°E-6°E	2.9 mm/jr
totaal	51°N-58°N, 2°W-8°E	2.6 mm/jr

Tabel 7.1: Gemiddelde trends in zeeniveau over 1993–2012 voor verschillende Noordzee regio's



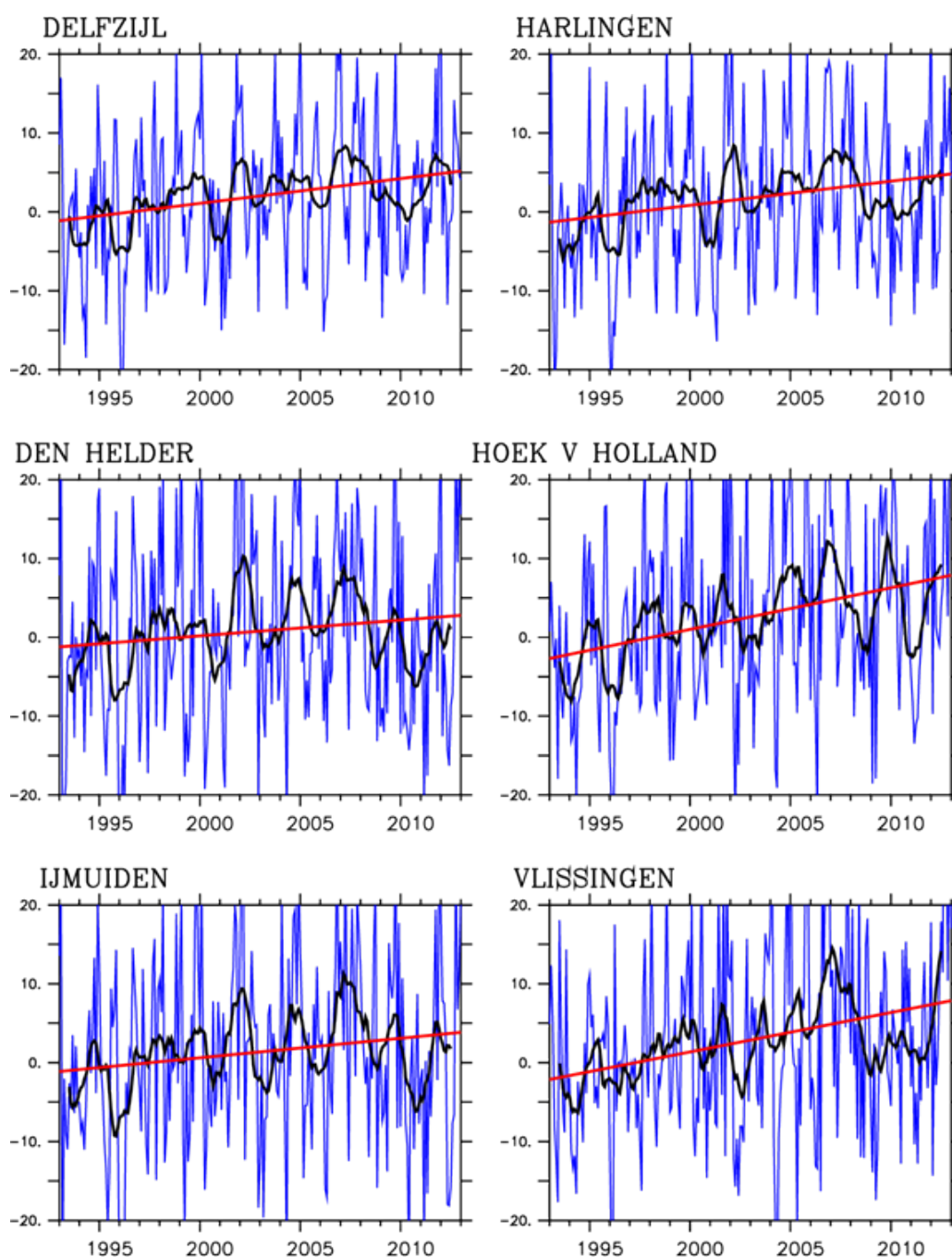
Figuur 7.2: Gemiddelde trend in zeeniveau over 1993–2012 (in mm/jaar), in het hele Noordzeegebied en langs de Nederlandse kust, op basis van maandgemiddelde altimetriedata

7.3.2 Altimetrie langs de kust

Vlak bij de kust zijn grote variaties in de trends in zeeniveau te zien (Fig. 7.2). Het is bekend dat altimetrie technieken lastig zijn toe te passen in ondiepe zeeën en in kustgebieden (Cipollini et al., 2009) dus het is niet bij voorbaat duidelijk hoe veel waarde kan worden gehecht aan deze variaties.

Figuur 7.3 laat de variaties in zeeniveau in de tijd zien op basis van de altimetrie voor de locaties van de zes hoofdstations. Net als bij de kustmetingen (Deltares, 2010)

zijn de variaties op korte tijdschalen veel groter dan de gemiddelde lineaire trend (rode lijn). In Tabel 2 staan de waarden van deze trends weergegeven per locatie. De locaties Vlissingen en Hoek van Holland laten een sterke trend zien; ze liggen in de buurt van het rode maximum in Fig. 7.2. De laagste trend geldt, volgens de altimetriegegevens, voor Den Helder (nabij het blauwe minimum). Vanwege de grote variaties op korte tijdschaal is een trend over 20 jaar niet robuust te bepalen (zie ook de discussie in Deltares, 2010). Dat blijkt ook uit de grote onzekerheidsmarge (Tabel 7.2).



Figuur 7.3: Tijdseries zeeniveau over 1993–2012 in de nabijheid van 6 kuststations, op basis van altimetriedata (blauw: maandgemiddelde data, zwart: eenjarig lopend gemiddelde, rood: lineaire trend).

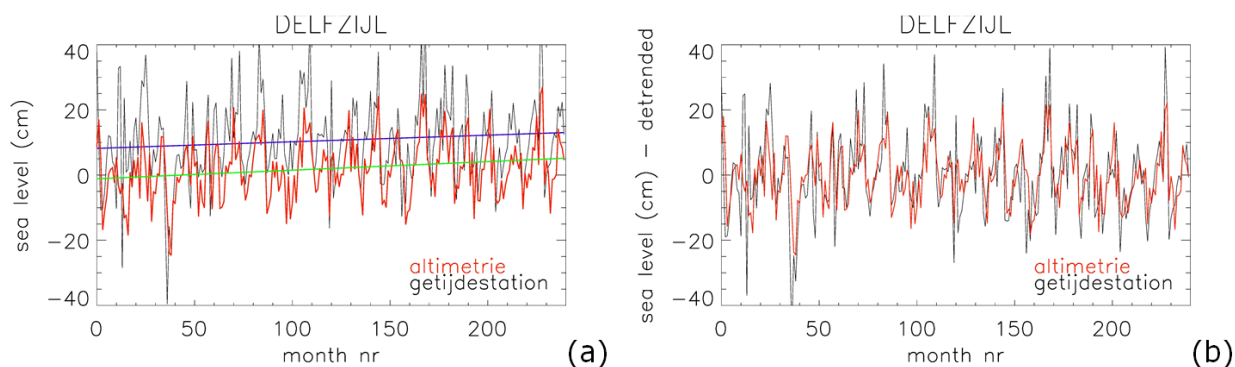
getijdestation	locatie	trend altimetrie mm / jaar	trend station mm / jaar	$\Delta / \sigma_{\text{getij}}$	correlatie tijdseries
Delfzijl	53.326°N 6.933°E	3.16±1.01	2.43±1.46	0.50	0.63 (0.75)
Harlingen	53.176°N 5.409°E	3.07±1.05	4.06±1.52	-0.65	0.61 (0.72)
Den Helder	52.964°N 4.745°E	1.84±1.36	2.28±1.27	-0.35	0.56 (0.71)
Hoek v Holland	51.978°N 4.120°E	5.11±1.27	2.88±1.03	2.16	0.49 (0.60)
IJmuiden	52.462°N 4.555°E	2.27±1.34	2.54±1.18	-0.23	0.48 (0.72)
Vlissingen	51.442°N 3.596°E	4.88±1.41	3.90±0.94	1.04	0.45 (0.54)

Tabel 7.2: Gemiddelde trends in zeeniveau per getijdestation langs de Nederlandse kust (in mm/jaar, met 1□ onzekerheid, periode 1993–2012), voor (kolom 3) altimetriegegevens, (kolom 4) lokale metingen. Kolom 5 geeft het verschil in de twee trends gedeeld door de standaarddeviatie van de trend in de getijdestation metingen; kolom 6 de correlatie tussen de twee meetseries na aftrek van trend voor de maandelijkse meetgegevens (als in Figuur 7.4b) en tussen haakjes het 6-maands lopend gemiddelde van deze metingen

7.3.3 Vergelijking met getijdestations aan de kust

De meetseries van de altimetrie vertonen op het oog grote gelijkenis met die van de getijdestations op de korte tijdschalen (zie Figuur 7.4 voor het voorbeeld Delfzijl, en paragraaf 7.6 voor de andere stations). Er is een verticale verschuiving zichtbaar in Figuur 7.4a, veroorzaakt door het verschil in referentie-stelsel tussen de twee meettechnieken. Voor het bepalen van de gemiddelde trends is dit uiteraard niet van belang.

De gemiddelde trends over 1993-2012 op basis van de getijdestations en de altimetrie zijn aangegeven als respectievelijk een blauwe en een groene lijn in Figuur 7.4.



Figuur 7.4: (a) Gemeten zeeniveau bij Delfzijl en lineaire trend daarin (periode 1993–2012, in cm): zwart/blauw: getijdestation, rood/groen: altimetrie; (b) als (a), na aftrek lineaire trendlijnen (x-as is aantal maanden sinds januari 1993)

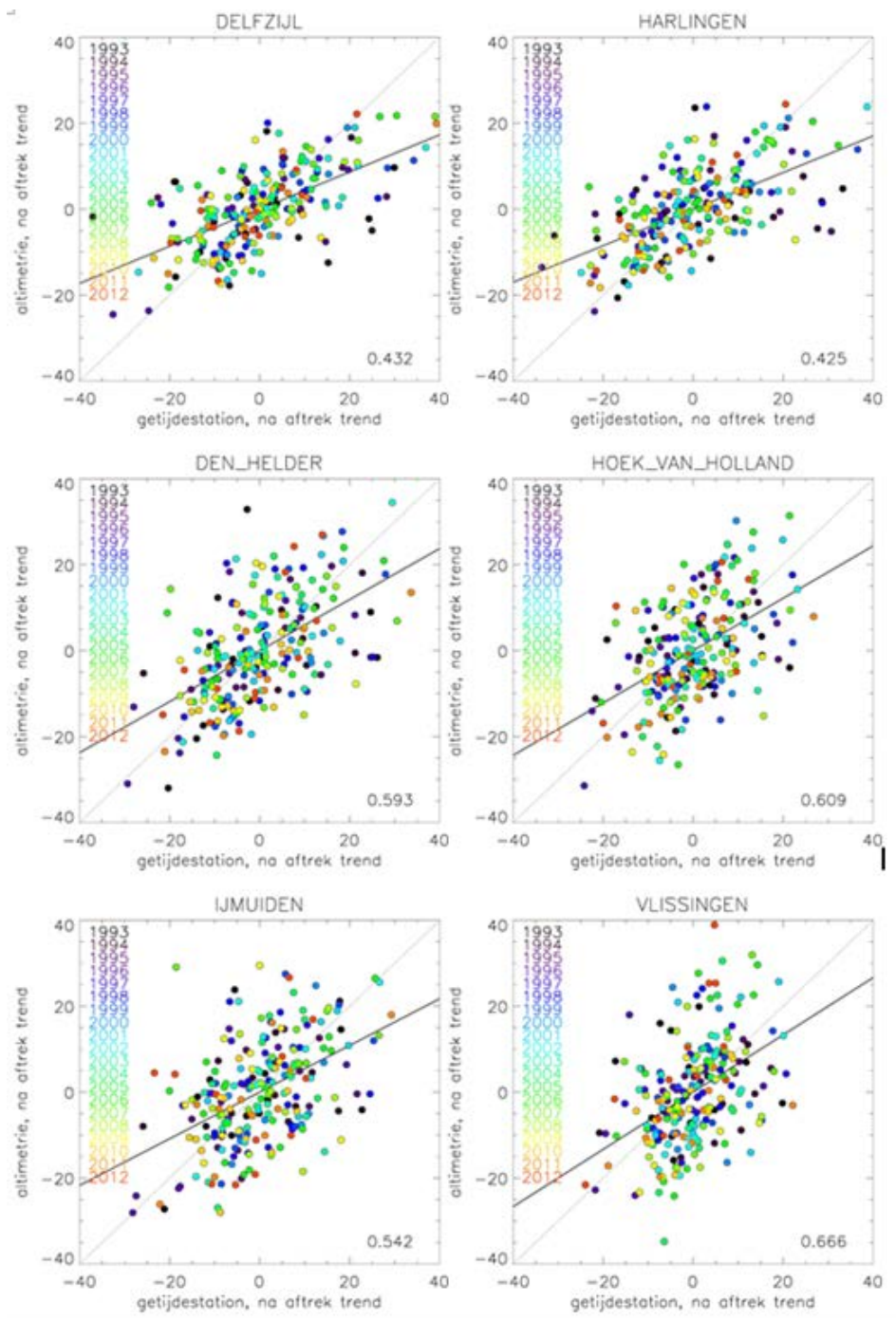
Er zijn grote verschillen tussen deze trends per locatie, maar op Hoek van Holland na verschillen de altimetrie-trends ongeveer één σ of minder van de trends bij de getijdestations (Tabel 7.2). De variaties langs de kust die te zien zijn in Figuur 7.2 komen dus kwalitatief overeen met de variaties tussen de getijdestations.

De overeenkomsten tussen de meetreeksen in Figuur 7.4b en de gerelateerde figuren voor de andere stations (paragraaf 7.6) wordt bevestigd door de redelijk hoge correlaties (Tabel 7.2). Ook scatter plots van de fluctuaties in de altimetrie-metingen en de metingen van de getijdestations (Figuur 7.5) laten een positief verband zien tussen beiden. Dit verband wordt sterker wanneer een 6-maands lopend gemiddelde van de metingen wordt gebruikt (Figuur 7.6, Tabel 7.2).

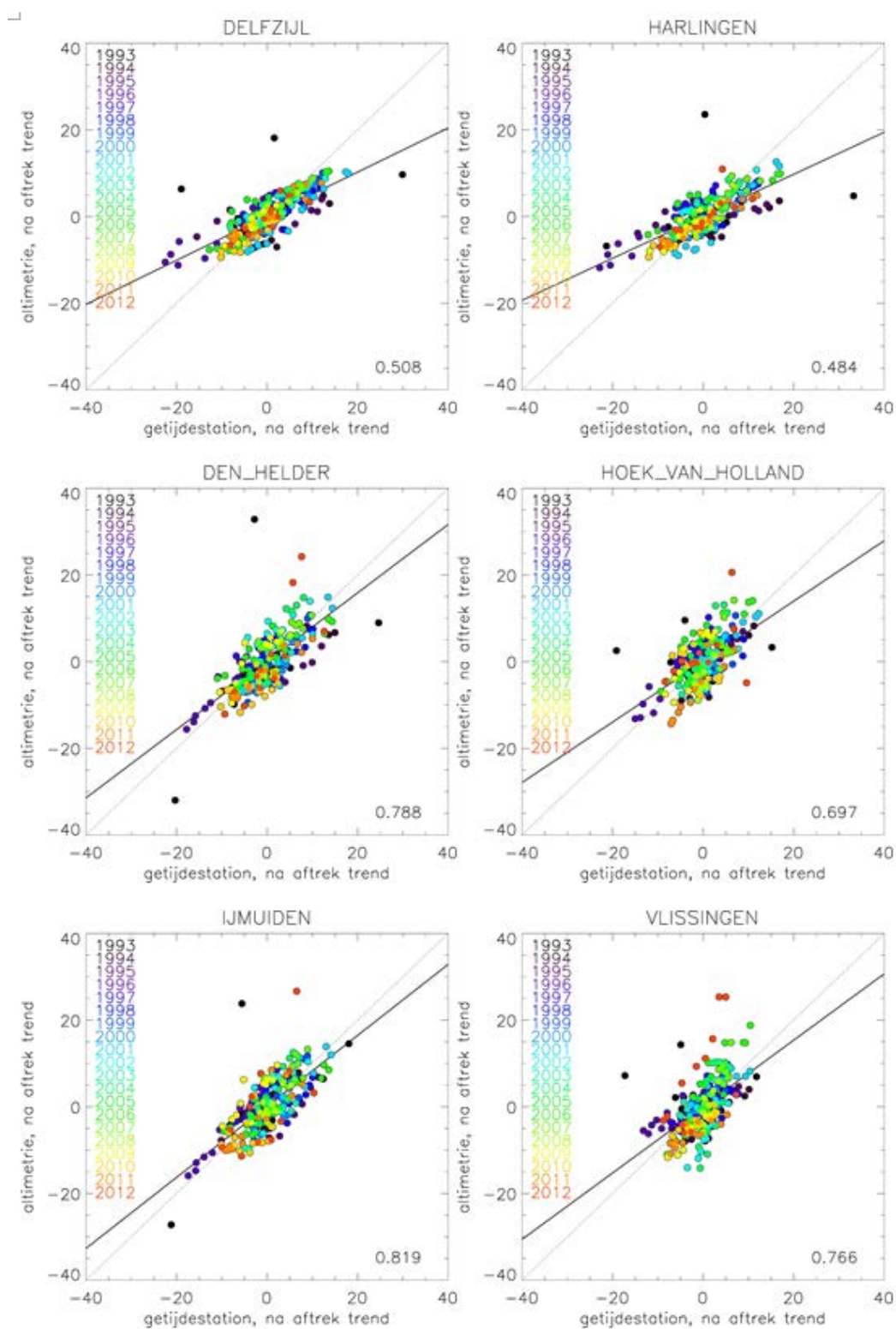
7.3.4 Gemiddelde trends zuidelijke Noordzee

De meetreeksen van het zeeniveau per locatie laten erg veel variaties op korte tijdschalen zien. De vraag rijst of door te middelen over een groter gebied wellicht een deel van dit ruissignaal kan worden uitgemiddeld, en een robuuste trend kan worden verkregen.

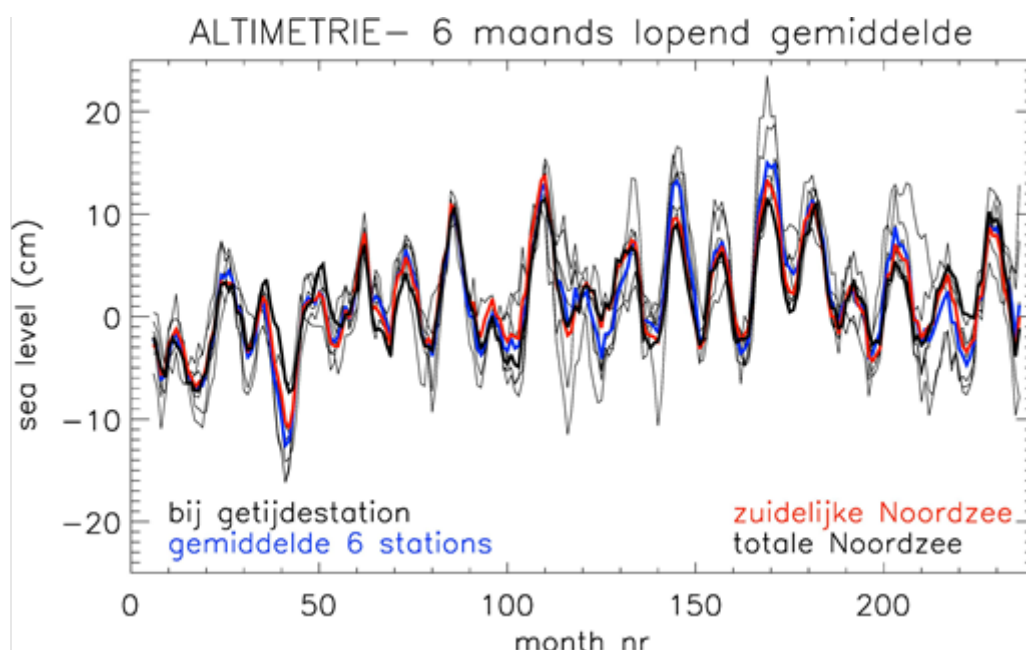
Figuur 7.7 laat de meetreeksen (6-maands lopend gemiddelde) uit altimetrie zien op de locaties van de getijdestations, gemiddeld over deze zes stations en gemiddeld over de zuidelijke en de totale Noordzee. De fluctuaties op tijdschalen van enkele maanden in alle meetreeksen zichtbaar, en consistent. Dit is in overeenstemming met de resultaten voor de maandelijkse meetgegevens gepresenteerd in Figuur 7.4 en paragraaf 7.6. De gemiddelde trends in zeeniveau voor deze tijdreeksen zijn gegeven in Tabel 7.3. De trendwaarden zijn vergelijkbaar met die voor de maandelijkse data (Tabel 7.2) maar de standaarddeviaties zijn veel kleiner. De standaarddeviatie van de individuele tijdreeksen per locatie zijn vergelijkbaar met die van de ruimtelijk gemiddelde reeksen (zuidelijke, totale Noordzee of 6 stations). Middelen in de tijd maakt de trends dus minder onzeker, middelen in de ruimte heeft geen noemenswaardige invloed.



Figuur 7.5: Scatter plots van variaties in het zeeniveau bij het getijdestation en in de altimetrie metingen (beiden na aftrek van de trend, kleuren geven het jaar van de metingen aan). Lineaire fit door de data is gegeven als een dikke zwarte lijn, met helling gegeven rechtsonder in elke figuur. Bij een helling van 1.0 zijn fluctuaties in beide meetreeksen even groot.



Figuur 7.6: Als figuur 7.5, maar voor het 6-maands lopend gemiddelde van de beide meetreeksen



Figuur 7.7: Zeeniveau als functie van de tijd voor (dunne zwarte lijnen) locaties in de buurt van de zes getijdestations, (blauw) gemiddeld over de zes getijdestations, (rood) zuidelijke Noordzee (51-53°N - 2-6°E) en (zwart) totale Noordzee (51-58°N - 2°W-8°E). Voor alle meetreeksen is een 6-maands lopend gemiddelde gebruikt.

Getijdestation	Trend altimetrie maandelijks data	Trend altimetrie 6-maands lopend gemiddelde
Delfzijl	3.16 ± 1.01	3.27 ± 0.53
Harlingen	3.07 ± 1.05	2.86 ± 0.54
Den Helder	1.84 ± 1.36	1.43 ± 0.68
Hoek v Holland	5.11 ± 1.27	4.89 ± 0.65
IJmuiden	2.27 ± 1.34	2.21 ± 0.68
Vlissingen	4.88 ± 1.41	4.28 ± 0.67
gemiddelde 6 stations	3.39 ± 1.03	3.16 ± 0.55
zuidelijke Noordzee	2.86 ± 0.96	2.64 ± 0.50
totale Noordzee	2.55 ± 0.89	2.60 ± 0.46

Tabel 7.3: Gemiddelde trends in zeeniveau per getijdestation langs de Nederlandse kust (in mm/jaar, met $\pm$ onzekerheid, periode 1993–2012), voor de maandelijkse meetgegevens en het 6-maands lopend gemiddelde van deze metingen (zuidelijke Noordzee is gedefinieerd als $y=51-53.5^{\circ}\text{N}$, $x=3.5-7^{\circ}\text{E}$)

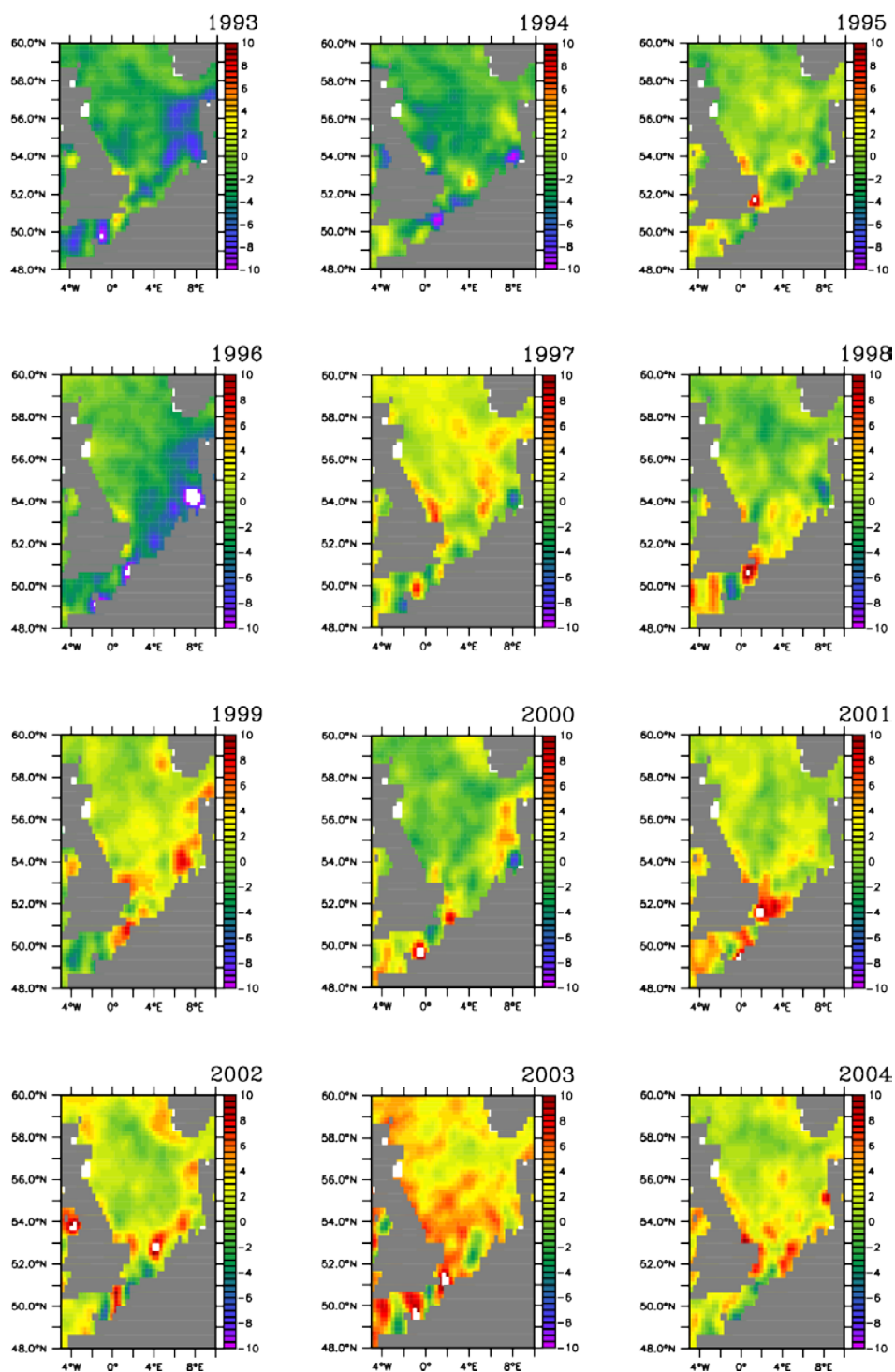
7.4 Conclusies en aanbevelingen

De gemiddelde trends in zeeniveau langs de Nederlandse kust, zoals gemeten met behulp van satelliet altimetrie, zijn vergelijkbaar met die gemeten door getijdestations. Variaties op korte tijdschalen zijn veel groter dan de langjarige trends. Omdat de altimetrie meetreeks slechts twintig jaar beslaat en de variaties op korte tijdschalen zo groot zijn is een trend over twintig jaar geen robuust getal. De

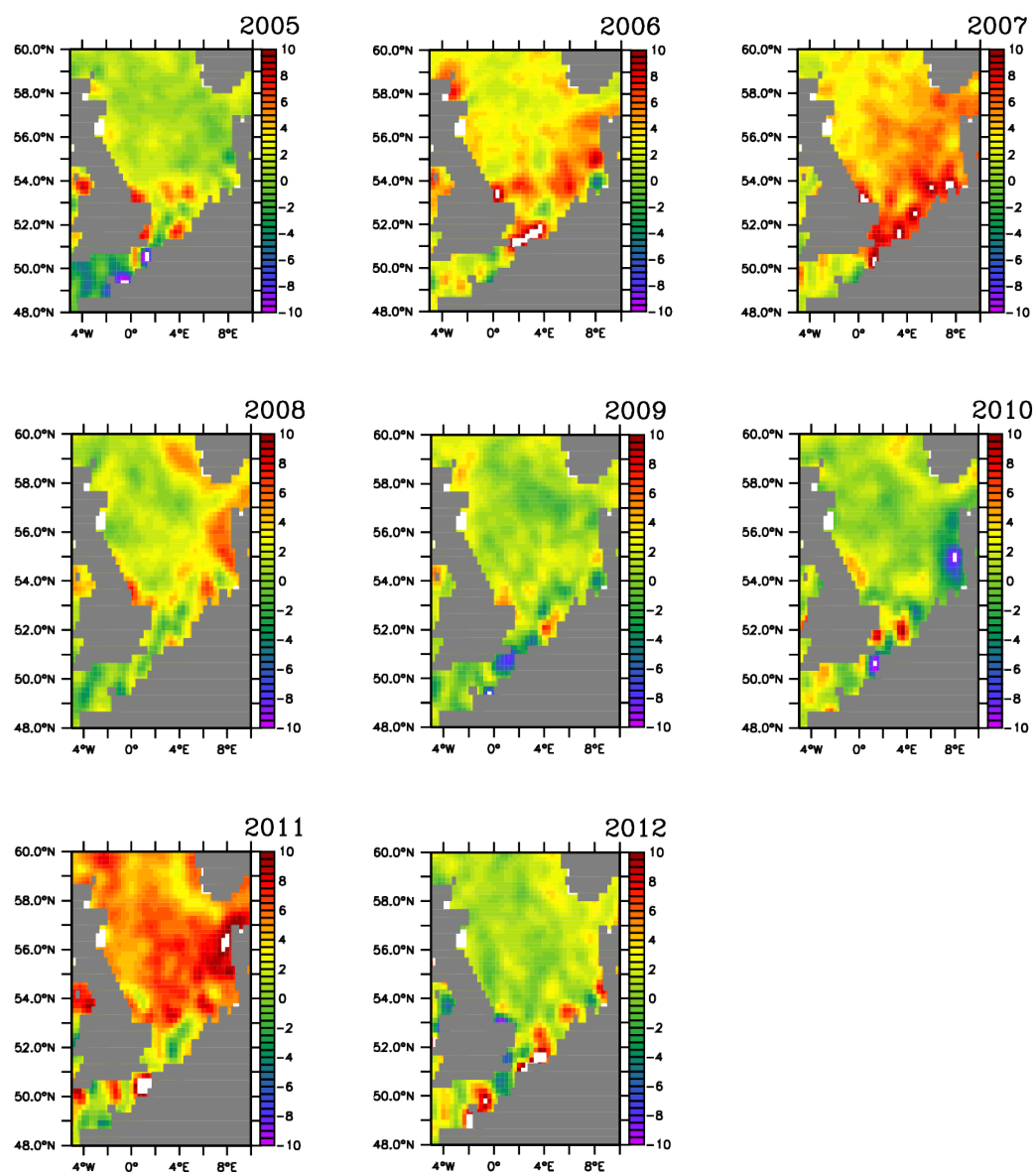
fluctuaties in de altimetrie metingen en in de stationsmetingen zijn sterk gecorreleerd. Hoewel de altimetrie metingen langs de kust verrassend veel overeenkomsten vertonen met die van de getijdestations, en het dus mogelijk lijkt om het gemeten signaal toe te schrijven aan verschillende processen zoals in de analyses van hoofdstuk 4, 5 en 6 wordt gedaan, blijft de geringe lengte van de meetreeks voorlopig nog een nadeel.

Met behulp van satellietdata is dus geen betrouwbaardere maat voor de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust te verkrijgen dan met behulp van de getijdestations. De metingen kunnen wel als bevestiging gelden van hetgeen met de getijdestations gevonden is.

7.5 Jaargemiddeld zeeniveau Noordzee

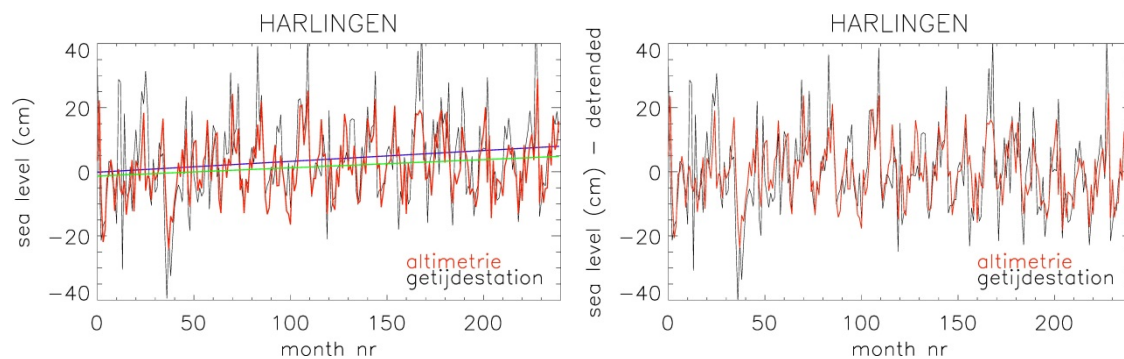


Figuur 7.8: Jaargemiddeld zeeniveau Noordzee uit satelliet altimetrie, voor de jaren 1993-2004 (in cm)

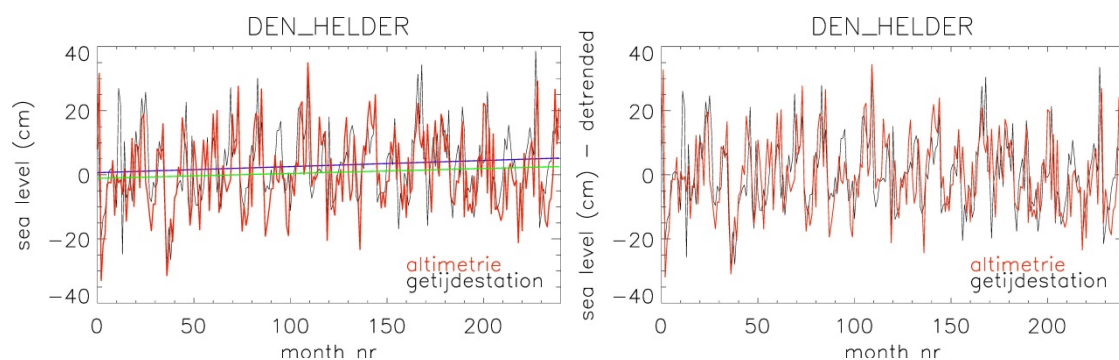


Figuur 7.9: Als Fig. 7.8, voor de jaren 2005-2012

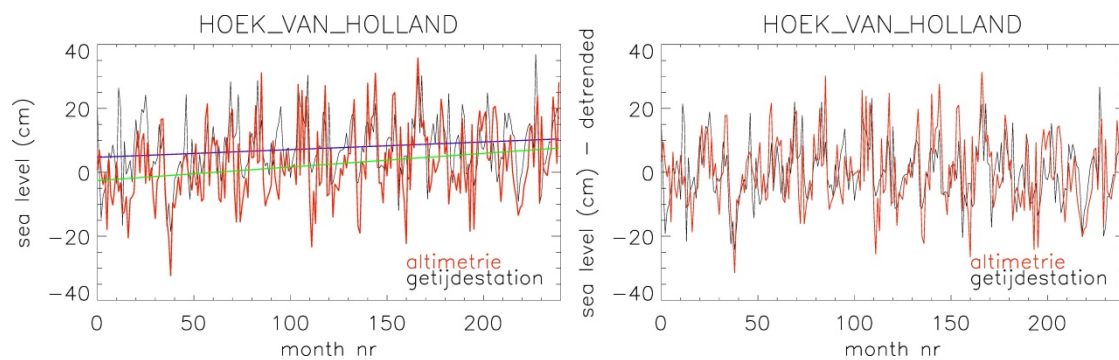
7.6 Zeeniveau bij getijdestations



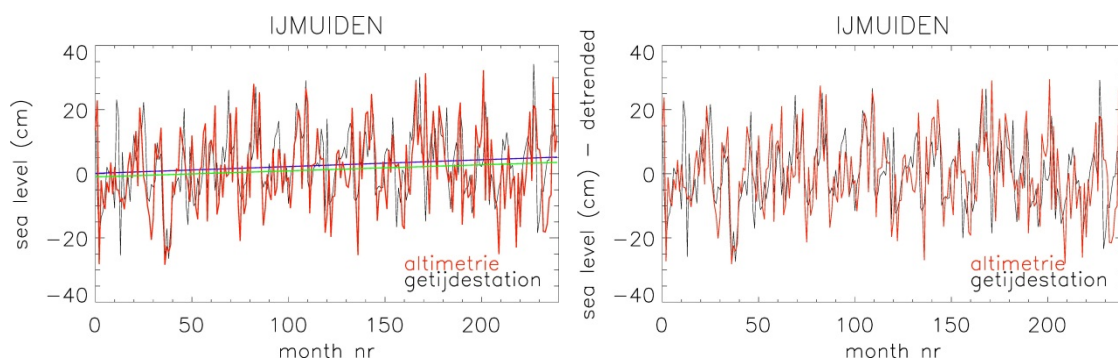
Figuur 7.10: (a) Gemeten zeeniveau bij Harlingen en lineaire trend daarin (periode 1993–2012, in cm): zwart/blauw: getijdestation, rood/groen: altimetrie; (b) als (a) na aftrek lineaire trend (x-as is aantal maanden sinds januari 1993)



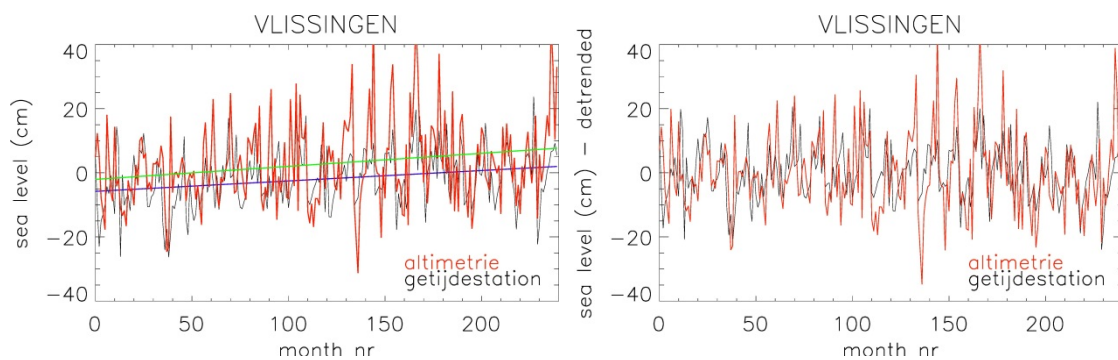
Figuur 7.11: Als Fig. 7.10, voor Den Helder



Figuur 7.12: Als Fig. 7.10, voor Hoek van Holland



Figuur 7.13: Als Fig. 7.10, voor IJmuiden



Figuur 7.14: Als Fig. 7.10, voor Vlissingen

8 Discussie, conclusies en aanbevelingen

8.1 Terugblik

De huidige methode voor het bepalen van de actuele zeespiegelstijging, zoals beschreven in Deltares (2010), is een lineaire fit door jaargemiddelde zeewaterstanden, rekening houdend met wijzigingen in het NAP en de nodale getijcyclus van 18,6 jaar.

Er zijn twee nieuwe modellen ontwikkeld voor het berekenen van de actuele zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Het ene model maakt eveneens gebruik van jaargemiddelde waterstanden, het andere van daggemiddelde waterstanden.

Er is onderzoek uitgevoerd, om te bepalen of het toevoegen van fysische variabelen leidt tot een verbetering in het verklaren van de variantie van de waterstand. Deze variantie bestaat uit een trend en fluctuaties rond de trend. Tabel 9.1 geeft een overzicht van de beschouwde modelcomponenten. Op basis van diverse criteria is bepaald welke componenten deel uit moeten maken van de beide nieuwe modellen.

De analyse heeft met name betrekking op de data voor de periode 1970-2012. De derde en de vierde kolom geven de voorgestelde modellen weer. In deze periode waren er in de geselecteerde databronnen gegevens beschikbaar voor alle variabelen uit Tabel 8.1. De methoden zijn eveneens gepresenteerd voor een aantal voorbeelden over de periode 1906-2012

Variabele	huidige methode, jaargemiddelden	nieuw model, daggemiddelden	nieuw model, jaargemiddelden
Tijd	x	x	x
Nodale cyclus	x	x	x
Harmonisch getij		x	
Wind		x	x
Luchtdruk		x	
NAO			
Rivierafvoer			

Tabel 8.1 Overzicht van modelcomponenten van het oorspronkelijke model (Deltares, 2010) en de twee nieuw ontwikkelde modellen.

8.2 Conclusies

Het uitgevoerde onderzoek resulteert in de volgende conclusies:

1. Het toevoegen van wind levert een significante verlaging van de variantie (de 'ruis'). Met de huidige methode wordt 25 tot 69% van de variantie in de jaargemiddelde waterstanden in de periode 1970-2012 verklaard. Het toevoegen van de wind als verklarende variabele laat dit percentage toenemen naar 75 tot 87%. Het nieuwe model op basis van dagwaarden verklaart 74 tot 83% van de variantie in de daggemiddelde waterstanden. Deze variantie is echter wel veel groter dan de variantie in de jaargemiddelde waterstanden.
2. Met een model op basis van daggemiddelden is het beter mogelijk om onderscheid te maken tussen de bijdragen van verschillende variabelen aan de variatie van de waterstand

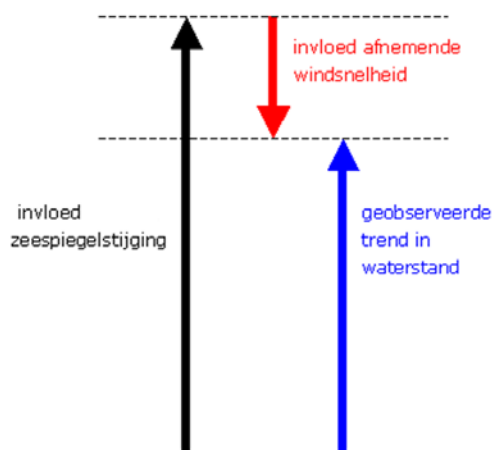
dan op basis van jaargemiddelden. Dit komt doordat bij daggemiddelden onderscheid gemaakt kan worden tussen de verschillende tijdschalen van de variabelen, terwijl bij het middelen over een jaar vrijwel alle informatie over tijdschalen verloren gaat. Voor de langere perioden met het beginpunt voor 1935 is deze niet toepasbaar

3. Door het toevoegen van verklarende variabelen is het mogelijk om onderscheid te maken tussen de invloed van de zeespiegelstijging die niet samenhangt met wind, getij en luchtdruk (zeespiegel_z) en veranderingen in de zeespiegel als gevolg van geleidelijke veranderingen van wind en/of luchtdruk(zeespiegel_{wL}).

4. Over de Noordzee is de windsnelheid in de periode 1970-2012 gestaag afgenomen. Omdat de wind in Nederland voornamelijk uit de westelijke sector komt, leidt een afname van de gemiddelde windsnelheid tot lagere gemiddelde waterstanden langs de kust. De afname in de windsnelheid maskeert dus het effect van de langjarige zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Figuur 9.1 geeft dit effect schematisch weer. Dit effect is het sterkst bij Harlingen en Delfzijl, vanwege de relatief sterke invloed van windopzet in de ondiepe Waddenzee.

5. De gemiddelde trends in zeeniveau langs de Nederlandse kust gemeten met behulp van satellietaltimetrie (periode 1993-2012), zijn vergelijkbaar met die gemeten door getijdestations. De variantie van de satellietdata, zelfs als deze over de gehele Noordzee gemiddeld zijn, is vergelijkbaar met die van de peilmeetstations. Met behulp van satellietdata is dus geen betrouwbaardere maat voor de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust te verkrijgen dan met behulp van de getijdestations. De satellietmetingen kunnen wel als bevestiging gelden van hetgeen met de getijdestations gevonden is.

6. De optimale methode hangt af van het toepassingsgebied (zie ook de aanbevelingen). Het is belangrijk om altijd ook de langst mogelijke reeks met betrouwbare metingen te gebruiken. Voor de Nederlandse kust is dit de periode 1890-2012. De LOESS methode geeft dan goed de ontwikkelingen weer van de recente periode die niet direct afhankelijk is van de vroegste ontwikkelingen terwijl wel een consistente weergave (een vloeiende lijn zonder sprongen of knikken) van de gehele tijdsperiode verkregen wordt.



Figuur 8.1 Schematische weergave van het effect van een afnemende windsnelheid op de geobserveerde trend in de waterstand langs de kust.

8.3 Beantwoording van de door RWS gestelde vragen:

1. Wat is een goede maat voor de huidige zeespiegelstijging ten behoeve het suppletieprogramma / de suppletiebehoefte?
2. Wat is een nulpunt voor de voorspellingen van zeespiegelstijging ten behoeve van dijkversterkingen?

Antwoord op de eerste vraag, uitgaande van alleen waarnemingen:

Een goede robuuste maat wordt verkregen door een lineaire fit door de data over een zolang mogelijke periode (vanaf 1890), waarbij rekening wordt gehouden met de NAP correctie en de 18,6 jarige nodale cyclus. De toegevoegde waarde van een kwadratische term in het model is nog niet voldoende duidelijk (zie de hier opvolgende discussie). Het tevens meenemen van verklarende variabelen, zoals wind en luchtdruk, heeft duidelijk meerwaarde. Wel is duidelijk geworden dat de reeksen met wind en luchtdrukdata eerst nader geanalyseerd moeten worden met ook andere stations data daarbij. Verlenging van de reeks terug tot 1890 is van zeer groot belang en ook mogelijk met de recent uitgevoerde heranalyses. Met hulp hiervan kan vervolgens ook weer beter naar de mogelijke versnelling gekeken worden.

Antwoord op de tweede vraag:

De tweede vraag is nu nog niet te beantwoorden. Allereerst moet daarvoor in de noodzakelijke vervolgstap de metingen en KNMI scenario's samengevoegd worden tot één geheel. Een lineaire rechte regressielijn voor verleden en toekomst is dan niet mogelijk. Een methodiek om tot een dergelijke samenvoeging en daarbij behorende curve te komen is voorgesteld in dit rapport.

8.4 Discussie

In de voorgaande hoofdstukken is de zeespiegelstijging bepaald over verschillende perioden en met verschillende methoden. Een belangrijke vraag is de volgende: Is er sprake van een versnelling van de zeespiegelstijging (gerelateerd aan het broeikaseffect)?

In hoofdstuk 6 lijkt er in een aantal gevallen sprake van een versnelling in de zeespiegelstijging, vooral in die gevallen waarbij de effecten van wind en luchtdruk zijn meegenomen. In Hoofdstuk 4 (zie ook Tabel 4.7) worden voor de periode 1970-2012 fors hogere waarden voor de zeespiegelstijging gevonden ten opzichte van de waarden voor de lange periode.

De sterke stijging van de reeks 1970-2012 lijkt vooral veroorzaakt te worden door een aantal jaren na 1970 met relatief lage waterstanden en waarvan de oorzaak onduidelijk is. In Duits onderzoek aan de hand van 15 duitse stations (Albrecht e.a.,2012) wordt deze "dip" eveneens geconstateerd.

Voor de wind zijn de data van de Kooy gekozen omdat deze al vanaf 1906 beschikbaar zijn, en omdat dit station dicht bij de kust ligt. Een nadere analyse van de homogeniteit van deze reeks en een vergelijkingsanalyse met andere windreeksen is gewenst voordat de eindresultaten voldoende robuust bevonden kunnen worden.

Gegeven alle resultaten tot nu toe is het nog te vroeg om met voldoende zekerheid te kunnen zeggen dat er sprake is van een versnelling in de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

8.5 Aanbevelingen

Algemeen

Met de in deze studie ontwikkelde methode (extra verklarende variabelen wind en luchtdruk) is een eventuele versnelling van de zeespiegelstijging eerder te constateren. Door de reeksen voor wind en luchtdruk terugwaarts te verlengen tot 1890 (punt 3) is dit nog verder te verbeteren. Koppeling van metingen en voorspellingen (punt 4 en Bijlage A) levert een consistente curve op met consistente antwoorden waarmee de tweede door RWS gestelde vraag beantwoord kan worden.

1. Er is langs de Nederlandse kust een duidelijk onderscheid tussen de geobserveerde zeespiegelstijging_{WL}, zoals die tot nu toe altijd gebruikt is, en de zeespiegelstijging_Z die onafhankelijk is van geleidelijke veranderingen in wind, getij en luchtdruk. Verschil tussen beiden wordt vooral veroorzaakt door een afname in de windsnelheid over de laatste jaren. De vraag welke waarde relevant is, hangt af van het toepassingsgebied. Bij vraagstukken rond waterveiligheid lijkt het beter om gebruik te maken van zeespiegelstijging_Z, de stijging die onafhankelijk is van geleidelijke veranderingen in wind, getij en luchtdruk. De windinvloed wordt hierbij al meegenomen via de relatie met windopzet. Hier zijn de eventuele veranderingen in extreme windsnelheden van belang, die tot uitdrukking dienen te komen in de actuele windstatistiek. Als voor een bepaalde toepassing de waterstand onder dagelijkse omstandigheden relevanter is, kan overwogen worden om de geobserveerde zeespiegelstijging_{WL} te hanteren (met inbegrip van de gemiddelde veranderingen in wind en luchtdruk). Bij vraagstukken rondom het suppleren van het kustfundament lijkt het beter om zeespiegelstijging_{WL} te gebruiken. Geleidelijke veranderingen ten gevolge van wind en luchtdruk zijn dan van belang. Een definitieve aanbeveling vergt een nadere onderbouwing.
2. Er is gebruik gemaakt van de winddata en luchtdruk bij de Kooy. Dit is een KNMI-station met een lange meetreeks (vanaf 1906) en een ligging dicht bij de kust. Net als getij stations kunnen ook wind stations erg van elkaar verschillen. Het is nodig om deze reeks op homogeniteit en trends te analyseren en te vergelijken met andere stations. We bevelen daarom aan om de hier toegepaste berekeningen te verifiëren met andere bronnen, zoals andere windstations (ook buitenlandse) en heranalyses van complete windsnelheidsvelden op zee (ERA-Interim, CFSR etc.). Een andere databron voor de wind kan leiden tot een andere berekende verdeling tussen de verandering in de waterstand ten gevolge van mondiale zeespiegelstijging en ten gevolge van een afnemende windsnelheid.
3. Het is belangrijk om altijd de langst mogelijke reeks te gebruiken. Voor de Nederlandse kust is dit de periode 1890-2012. Voor een beter inzicht in de langjarige schommelingen kan gebruik worden gemaakt van lokale regressie met de LOESS methode. Deze methode geeft goed de ontwikkelingen weer, terwijl tevens een consistente weergave (een vloeiende lijn zonder sprongen of knikken) van de gehele tijdsperiode verkregen wordt. De winddata ontbreken voor de periode 1890-1906 bij meetstation De Kooy. Het vervangen van de ontbrekende waarden door bijvoorbeeld de gemiddelde waarde of op een andere wijze vergt nog nadere studie. Nieuwe heranalyses van windsnelheden op zee kunnen deze data vermoedelijk ook gaan leveren.
4. We bevelen aan om de in Bijlage A aangegeven methode toe te passen op de in het voorjaar 2014 beschikbare nieuwe KNMI scenario's voor de zeespiegelstijging en deze te

koppelen aan de waargenomen zeespiegelstijging. Het is dan noodzakelijk om te beschikken over een maat ten aanzien van de betrouwbaarheid van deze scenario's.

Gegevens

5. Het is binnen het tijdsbestek van deze studie niet gelukt om het astronomisch getij te bepalen voor de periode vóór 1970. We bevelen aan om het astronomisch getij voor de hele periode van de waterstandsmetingen te berekenen, inclusief bijbehorende constituenten.

Frequentie van metingen en bijstelling zeespiegelstijging

6. De frequentie van de huidige metingen (waterstand, wind en luchtdruk) is voldoende frequent om de analyses zoals gepresenteerd in dit rapport uit te voeren. Opvoeren van meetfrequentie heeft geen meerwaarde voor het bepalen van trends in de tijdspanne van decennia.
7. De opgetreden en de in de nabije toekomst te verwachten zeespiegelstijging ten behoeve van het toetsingsprogramma (veiligheid) wordt om de 6 jaar (straks om de 12 jaar) bepaald. De waarde van de zeespiegelstijging (20 cm per eeuw) ten behoeve van kustlijnzorg (suppleties) is nog nooit bijgesteld. Aanbevolen wordt om dit voor beide toepassingen om de 12 jaar te doen, samen met andere kenmerkende waarden zoals slotgemiddelden en havengetallen. Deze laatste werden tot op heden om de 10 jaar bepaald (slotgemiddelden 2001.0 zijn samen met de slotgemiddelden 2011.0 bepaald in 2013 door Deltares in opdracht van RWS, deze zullen spoedig door RWS beschikbaar gesteld worden via de RWS website). Het is echter onhandig om hier verschillende perioden voor te hanteren. De 12-jaarlijkse veiligheidstoetsing geeft dan een goede maat voor de frequentie. Continuïteit en kwaliteitsborging vragen om aandacht.

Regionale resolutie

8. De peilmeetstations laten elk een andere zeespiegelstijging zien. De oorzaak hiervan staat niet vast. Vanuit de analyse van de satellietdata lijkt het dat er op de schaal van de Noordzee voor de absolute zeespiegelstijging geen patronen herkenbaar zijn. Het is onbekend of en aan welke fysische processen deze patronen zijn gerelateerd. De bodemdaling langs de Nederlandse kust verklaart de verschillen niet. Aanbevolen wordt voor de Nederlandse kust uit te gaan van één waarde.

Beheer en onderhoud van programmatuur en website

9. In dit project is ten behoeve van Rijkswaterstaat en de bredere buitenwereld een website ontwikkeld. Om de rekenmethode te borgen en makkelijk beschikbaar te maken is een webapplicatie ontwikkeld (sealevel in openearth), waarmee de in deze studie ontwikkelde methode op een simpele manier toegepast kan worden op de gemeten zeespiegelstanden van de zes verschillende hoofdpeilmeetstations langs de Nederlandse kust en op alle andere getijdestations over de wereld.

De zeespiegel is slechts een van de vele kust indicatoren die goed geborgd moet zijn. Voorgesteld wordt om de gemaakte webapplicatie te combineren met een van de andere websites waar indicatoren beschikbaar worden gemaakt, bijvoorbeeld de Kustviewer. Zo kan een centraal en consistent portfolio van kustkengetallen gevormd worden.

9 Referenties

- Albrecht, F. and Weisse, R., 2012, Pressure effects on past regional sea level trends and variability in the German Bight, *Ocean Dynamics* (2012) 62:1169–1186
DOI 10.1007/s10236-012-0557-1
- Baart, F., P.H.A.J.M. Van Gelder, J. De Ronde, M. Van Koningsveld en B. Wouters (2012). The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates. *Journal of Coastal Research*, 28(2), 511–516. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Bakker, A.M.R., B. J. J. M. Van den Hurk en J. P. Coelingh (2012). Decomposition of the windiness index in the Netherlands for the assessment of future long-term wind supply, *Wind Energ.* (2012), John Wiley & Sons, Ltd.
- Bojariu, R. en L. Gimeno (2003). Predictability and numerical modelling of the North Atlantic Oscillation. *Earth Science Reviews*, Vol 63/1-2, 145-168.
- Cipollini, P., J. Benveniste, J. Bouffard, W. Emery, L. Fenoglio-Marc, C. Gommenginger, D. Griffin, J. Hoyer, A. Kurapov, K. Madsen, F. Mercier, L. Miller, A. Pascual, M. Ravichandran, F. Shillington, H. Snaith, P. Strub, D. Vandemark, S. Vignudelli, J. Wilkin, P. Woodworth, and J. Zavala-Garay, 2009: The Role of Altimetry in Coastal Observing Systems. community white paper, <http://www.oceanobs09.net/proceedings/cwp/cwp16>.
- Deltares (2010). Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte; Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament. D. Dillingh, F. Baart en J.G. de Ronde. Deltares rapport 1201993-002.
- Flater, D. (1996). A brief introduction to XTide. *Linux Journal* 1996.32es (1996): 6.
- HKV (2012). Schatting van de actuele zeespiegelstijging uit metingen, overzichtsdokument met relevante aspecten. HKV rapport pr2451.10, V. Vuik en M. Kok, 18 december 2012.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, en S. Lentz (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geosciences*, 28 (2002), 929-937.
- Wang, X.L., F.W. Zwiers, V.R. Swail en Y. Yeng (2009). Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874–2007. *Clim Dyn* (2009) 33:1179–1195.

A Combinatie van de zeespiegelschattingen van de procesmatige aanpak (KNMI) en de empirische aanpak

In het voorjaar van 2014 worden de nieuwe KNMI voorspellingen van de zeespiegelstijging tot 2100 gepresenteerd. In dit Hoofdstuk wordt een methode gepresenteerd om tot een voorspellingslijn te komen van de zeespiegelstand vanuit het verleden (rond 1900) tot in de toekomst (2100). Daar kan dan vervolgens ook de waarde van de huidige zeespiegelstijging uit afgeleid worden.

Waar we in geïnteresseerd zijn is de kans op een zeespiegel niveau op tijdstip t (hypothese) gegeven de observaties (data). Deze berekening is een vorm van bayesiaanse inferentie, in tegenstelling tot de frequentistische inferentie. De berekening is gebaseerd op een wisselwerking tussen de gegevens en de theorie. Om dit uit te rekenen hebben we de volgende kansen nodig.

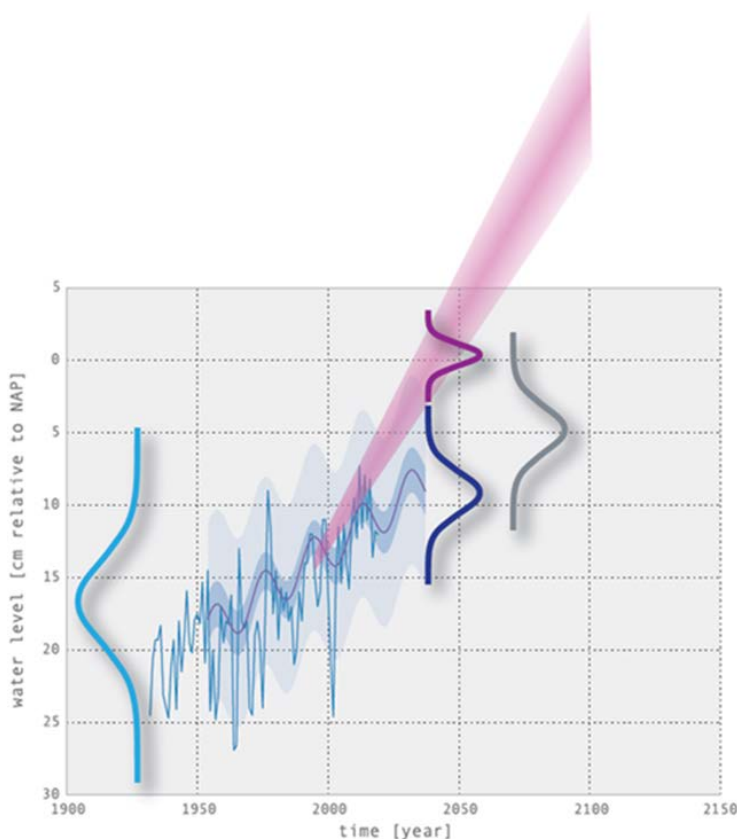
$$P(\underbrace{\text{data}}_{\text{observed means}})$$

$$P(\underbrace{\text{hypothesis}}_{\text{knmi scenario}})$$

$$P(\underbrace{\text{data} | \text{hypothesis}}_{\text{linear trend}})$$

$$P(\text{hypothesis} | \text{data}) = P(\text{hypothesis}) \frac{P(\text{data} | \text{hypothesis})}{P(\text{data})}$$

In Figuur 1 is dit weergegeven. De waargenomen zeespiegelstanden staan in het lichtblauw gegeven inclusief de fit eraan en de extrapolatie die doorloopt tot 2040. Voor het jaar 2040 is de verdeling ervan getoond in het donker blauw. De voorspelling staat in het paars gegeven en de verdeling ervan voor het jaar 2040 eveneens in het paars. Beide voorspellingen voor 2040 kunnen met de bovenstaande formule gecombineerd worden tot een gezamenlijke voorspelling met de verdeling ervan aangegeven in het grijs. Deze methode kan voor de gehele tijdreeks uitgevoerd worden om aldus een volledige voorspellingslijn te krijgen van 2010 tot in dit geval 2040. Per jaar kan eveneens de helling (zeespiegelstijging) bepaald worden.



Figuur 1: Combinatie van de zeespiegelschattingen van de procesmatige aanpak (KNMI) en de empirische aanpak.

Benodigde activiteiten

Het uitwerken van deze methodiek vereist enig onderzoek en integratie. Gegevens en aannames over de kansverdelingen is een vereiste. Voor de kansverdelingen kan gerekend worden met kansverdelingen van de regressielijn (betrouwbaarheidsintervallen) of met de kansverdelingen van de jaarlijkse zeespiegelwaarden (predictie intervallen). De kansverdelingen voor het statistische model en voor de gemeten gegevens zijn goed te bepalen. De intervallen voor de scenario's van het KNMI zijn iets ingewikkelder, omdat er geen volledige kansverdelingen gegeven worden, maar alleen de 5, 50 en 95% waarden.

Voor scenario's worden doorgaans geen echte kansen berekend. De hypothese bij een scenario is vaak in de vorm "het zou kunnen dat". De IPCC werkt bijvoorbeeld met kwalitatieve kansen, hetgeen geen praktisch nut heeft, in ieder geval niet in de context van bovenstaande berekening.

De kansverdelingen in deze berekening zijn a-priori en dus per definitie een vooronderstelling. Iets veronderstellen is belangrijker dan iets juist veronderstellen. Het is wel belangrijk dat een kwantitatieve vooronderstelling wordt gedaan omdat anders niet gerekend kan worden, en de scenario's ook niet verwerpbaar zijn (zie de discussie in Baart 2012a). Als het KNMI, in navolging van het IPCC, geen kwantitatieve kansen bij de scenario's definieert is het logisch om in samenspraak met de KNMI een kansverdeling te veronderstellen, bijvoorbeeld een gelijke kans per scenario's of een normale verdeling door de vier scenario's.

Als de methoden voor de kansverdelingen bepaald zijn kan de berekening, worden opgenomen in de zeespiegelwebsite en jaarlijks en bij nieuwe scenario's worden aangevuld.

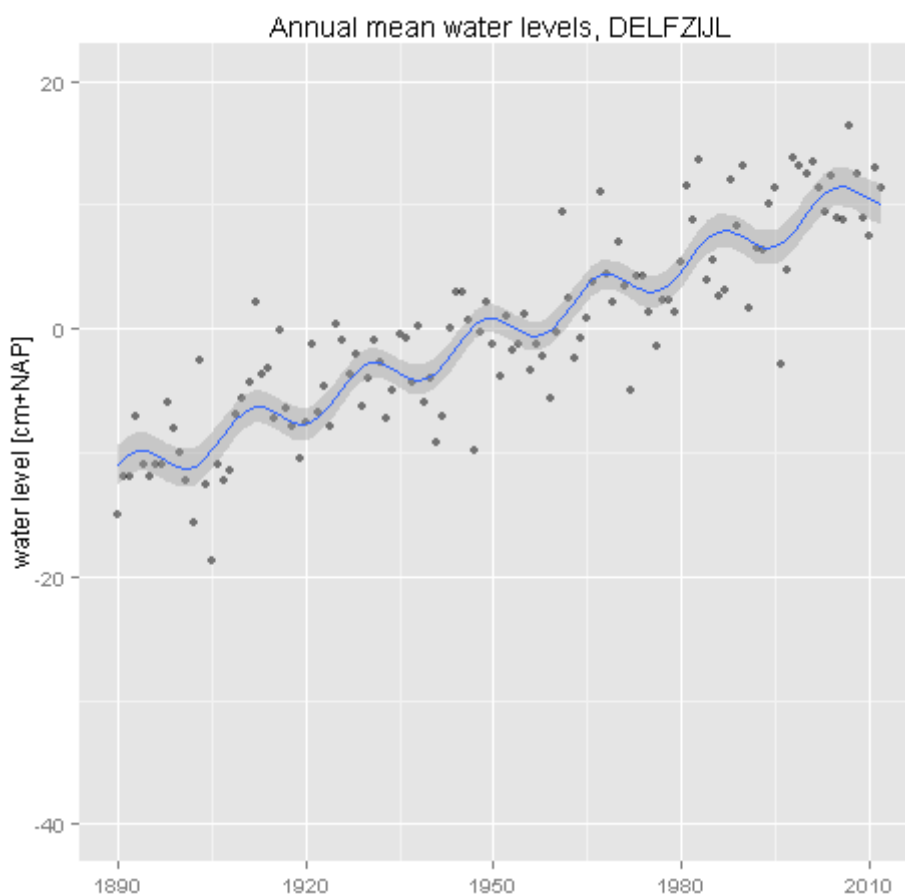
B Jaargemiddelden Den Helder

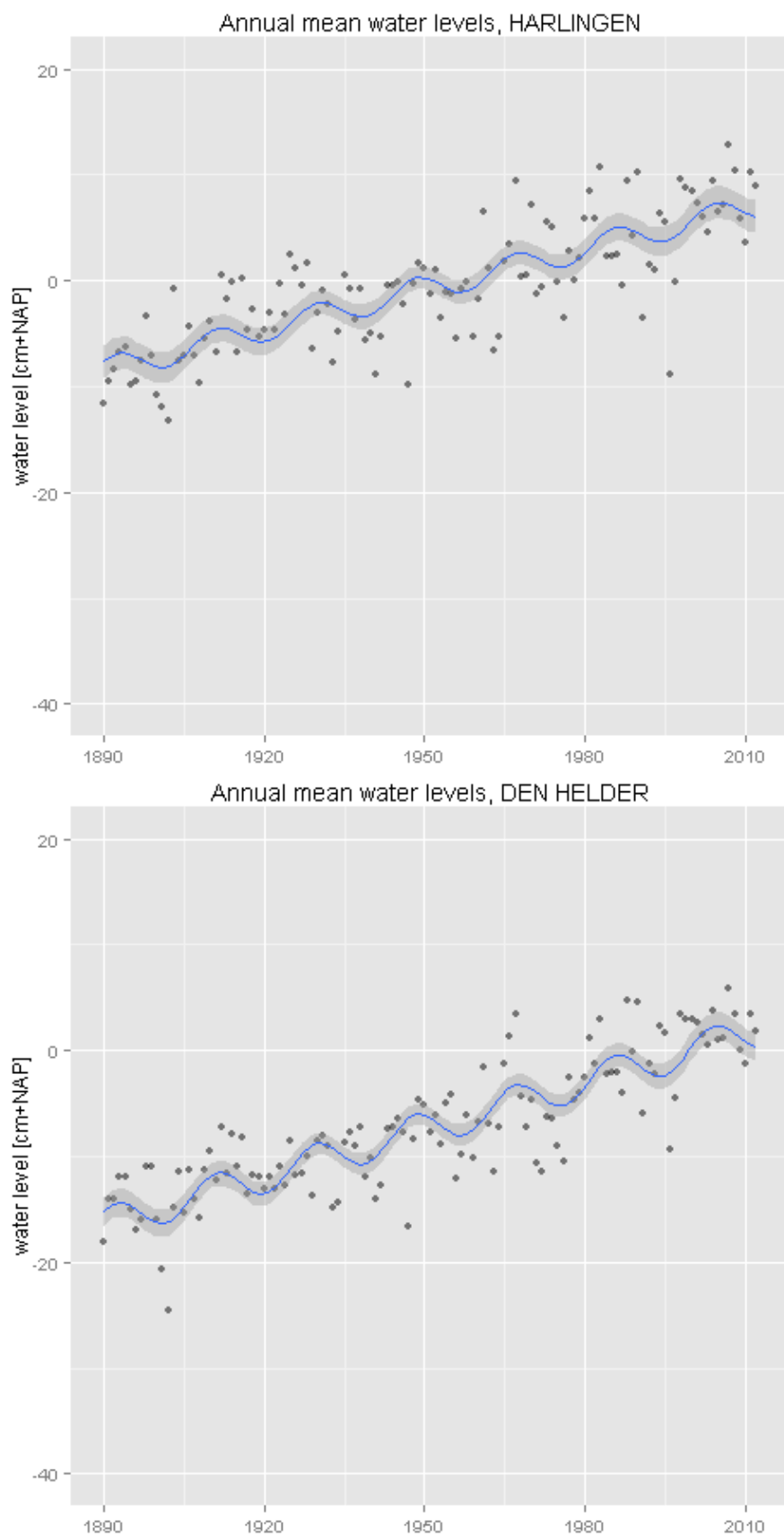
jaar	PSMSL	reproductie	verschil	metingen
1932	-9.2	-9.1	0.1	2927
1933	-14.9	-15.5	-0.6	25
1934	-14.3	-14.5	-0.2	2919
1935	-8.8	3.9	12.7	33
1936	-7.6	-7.5	0.1	2927
1937	-9.1	69.0	78.1	1
1938	-0.6	-19.3	-18.7	247
1939	-12.0	-12.0	0.0	2920
1940	-10.1	-10.1	0.0	2928
1941	-14.0	-13.9	0.1	2920
1942	-12.6	-5.8	6.8	2200
1943	-7.5	-7.5	0.0	2920
1944	-7.1	-7.1	0.0	2928
1945	-6.5	-6.5	0.0	2920
1946	-8.0	-8.1	-0.1	2920
1947	-16.6	-16.6	0.0	2920
1948	-8.3	-8.3	0.0	2928
1949	-4.6	-4.5	0.1	2920
1950	-5.3	-5.5	-0.2	2920
1951	-7.7	-7.7	0.0	2920
1952	-6.1	-6.1	0.0	2928
1953	-9.0	-8.9	0.1	2920
1954	-4.8	-4.8	0.0	2920
1955	-4.1	-4.1	0.0	2920
1956	-11.9	-11.9	0.0	2928
1957	-9.8	-9.9	-0.1	2920
1958	-6.1	-6.1	0.0	2920
1959	-10.0	-10.0	0.0	2920
1960	-6.8	-6.8	0.0	2928
1961	-1.6	-1.6	0.0	2920
1962	-6.9	-6.9	0.0	2920
1963	-11.4	-11.4	0.0	2920
1964	-7.2	-7.2	0.0	2928
1965	-1.2	-1.3	-0.1	2920
1966	1.4	1.4	0.0	2920
1967	3.6	3.6	0.0	2920
1968	-4.3	-4.0	0.3	2928
1969	-7.3	-7.3	0.0	2920
1970	-4.8	-4.8	0.0	2920

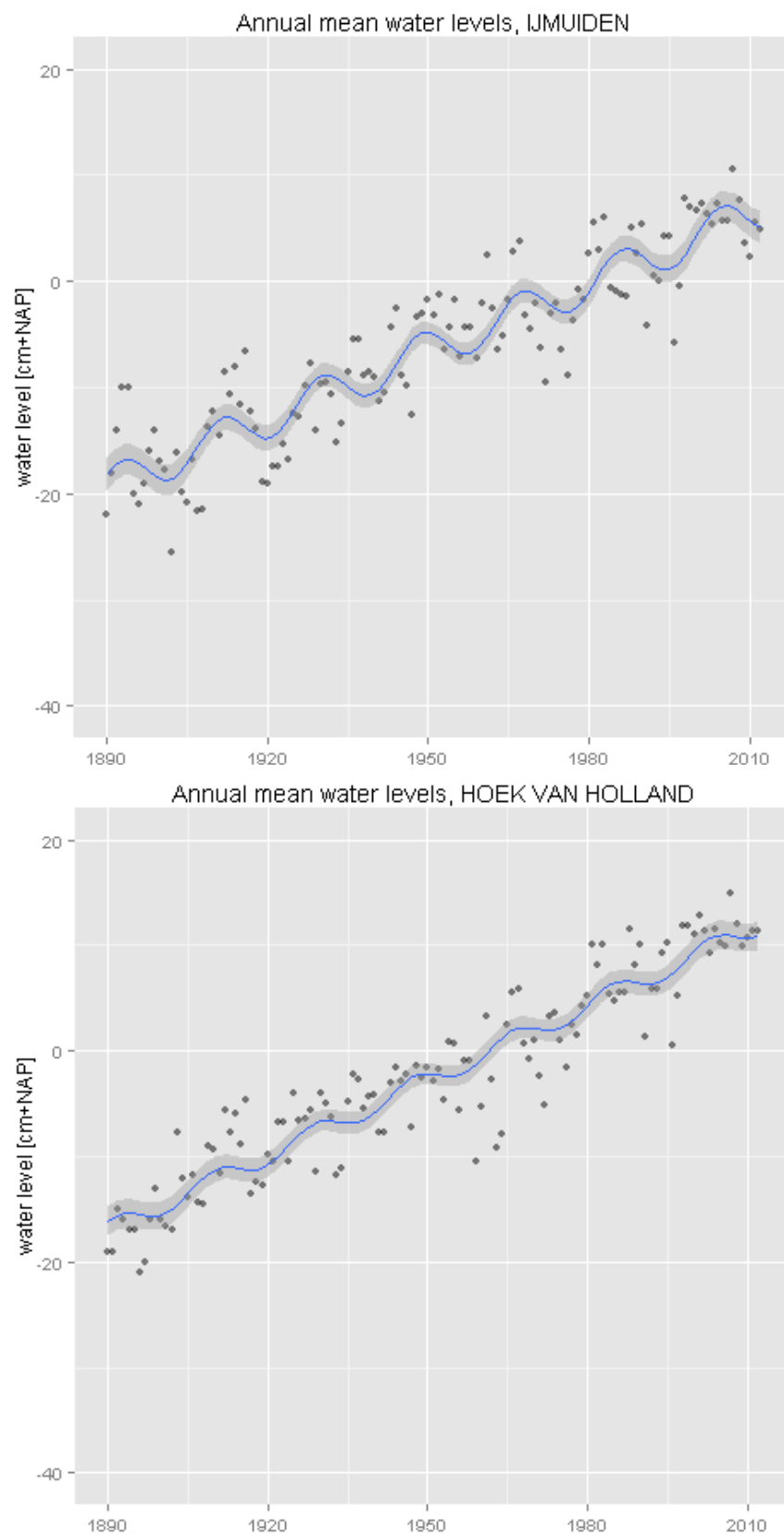
1971	-10.3	-10.3	0.0	8760
1972	-11.5	-11.5	0.0	8784
1973	-6.3	-6.3	0.0	8760
1974	-6.5	-6.5	0.0	8760
1975	-9.1	-9.1	0.0	8760
1976	-10.4	-10.4	0.0	8784
1977	-2.5	-2.5	0.0	8760
1978	-4.6	-4.6	0.0	8760
1979	-4.0	-4.0	0.0	8760
1980	-2.6	-2.6	0.0	8784
1981	1.2	1.2	0.0	8760
1982	-1.2	-1.2	0.0	8760
1983	3.0	3.0	0.0	8760
1984	-2.3	-2.3	0.0	8784
1985	-2.1	-2.1	0.0	8760
1986	-2.1	-2.1	0.0	8760
1987	-4.0	-4.0	0.0	52555
1988	4.7	4.7	0.0	52704
1989	-0.1	-0.1	0.0	52560
1990	4.5	4.5	0.0	52560
1991	-6.0	-6.0	0.0	52560
1992	-1.2	-1.2	0.0	52704
1993	-2.4	-2.3	0.1	52560
1994	2.2	2.2	0.0	52560
1995	1.7	1.7	0.0	52560
1996	-9.3	-9.3	0.0	52704
1997	-4.5	-4.5	0.0	52560
1998	3.5	3.5	0.0	52560
1999	3.0	3.0	0.0	52560
2000	2.8	2.8	0.0	52704
2001	2.7	2.7	0.0	52560
2002	1.5	1.5	0.0	52560
2003	0.5	0.5	0.0	52560
2004	3.7	3.7	0.0	52704
2005	-0.7	-0.7	0.0	52560
2006	-0.5	-0.5	0.0	52560
2007	4.2	4.2	0.0	52560
2008	1.7	1.7	0.0	52704
2009	-1.7	-1.7	0.0	52560
2010	-3.0	-3.0	0.0	52560
2011	1.7	1.7	0.0	52560
2012	0.2	0.1	-0.1	52704

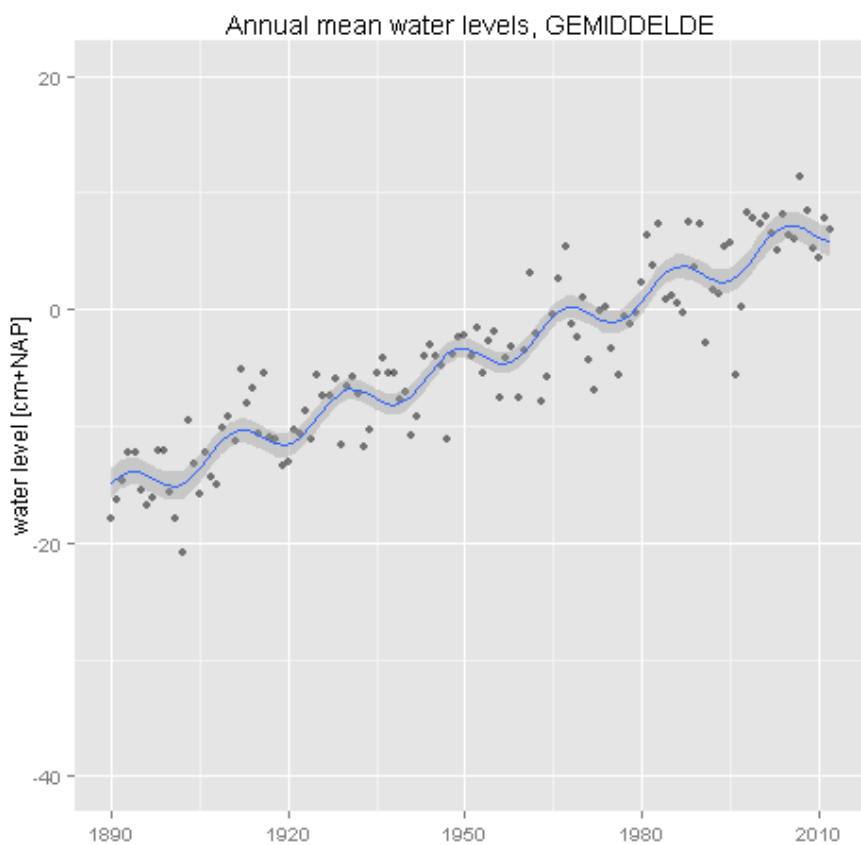
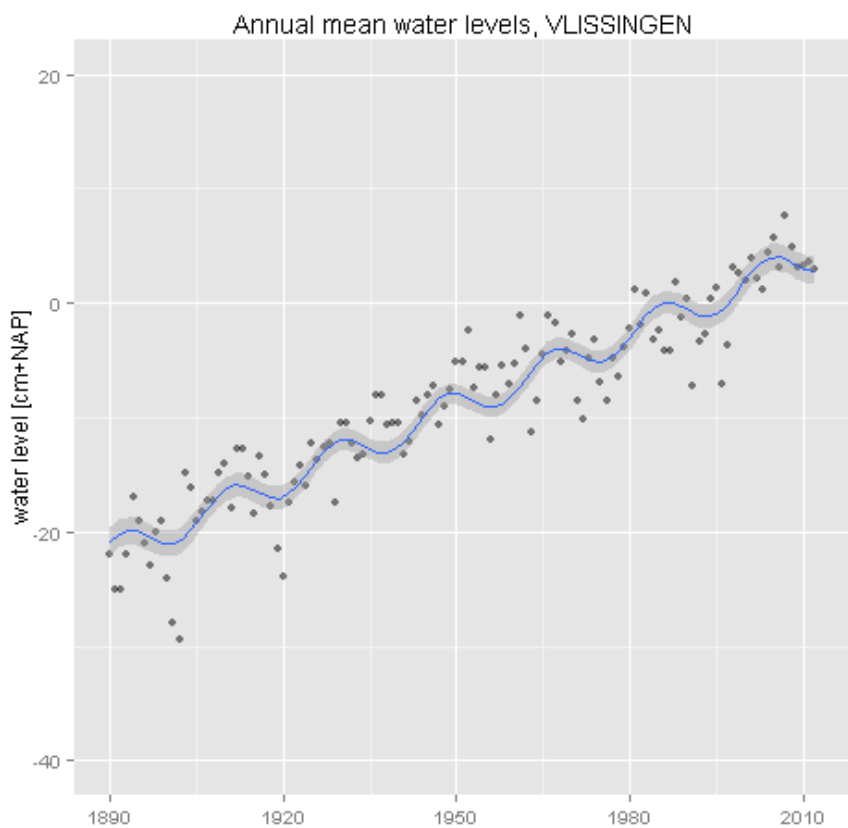
C Zeespiegelstijging 1890-2012

Deze bijlage bevat figuren met de jaargemiddelde waterstanden voor de periode 1890-2012 voor de 6 hoofdstations langs de Nederlandse kust (Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland, Vlissingen) en het gemiddelde voor deze stations. Naast de waterstanden is een regressielijn weergegeven, bestaand uit een lineaire trend en een nodale cyclus met een periode van 18,6 jaar. De parameters van het model (nulpunt, zeespiegelstijging, amplitude en fase van de nodale cyclus) worden zodanig gekozen dat de kwadratische verschillen tussen de observaties en het model minimaal zijn. De figuren tonen de regressielijn in blauw en het bijbehorende 95% betrouwbaarheidsinterval in grijs.









D Figuren o.b.v. daggemiddelden

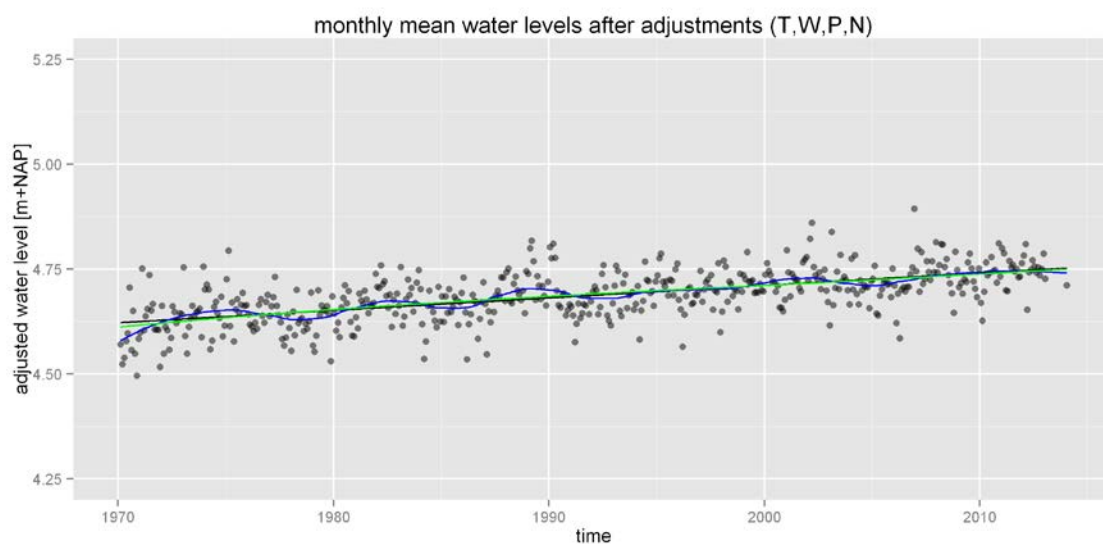
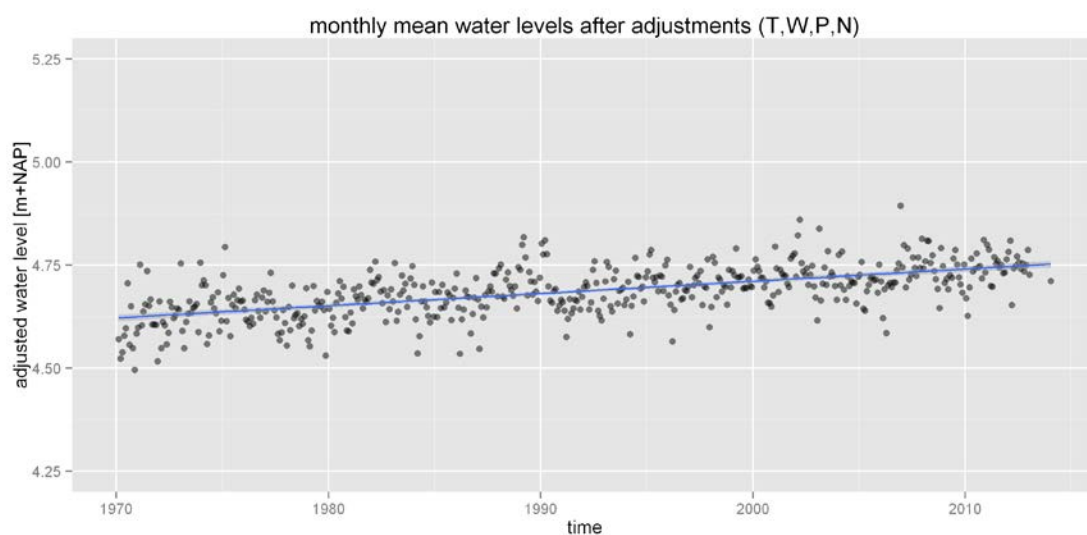
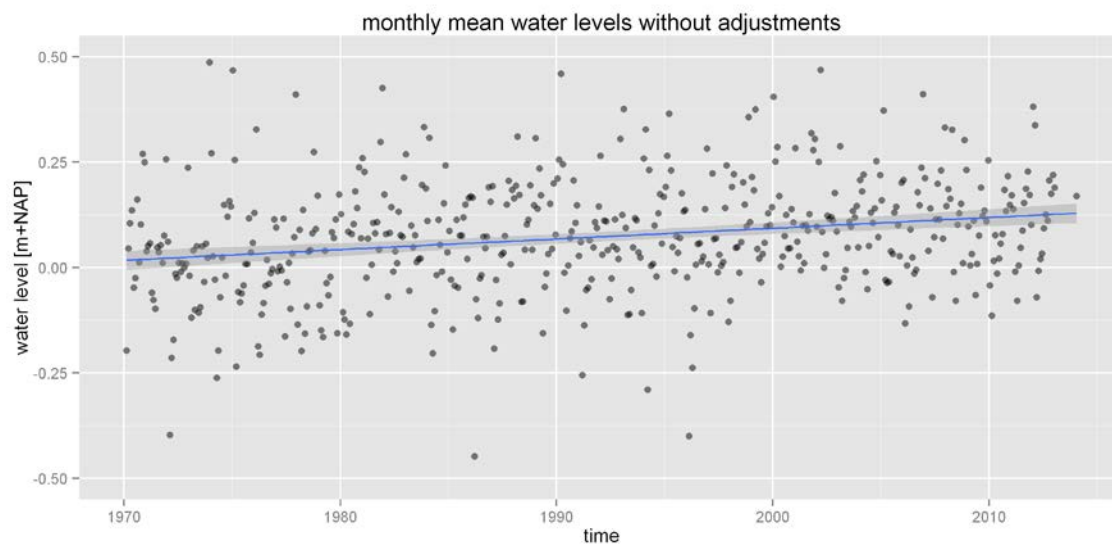
Deze bijlage geeft een weergave van het resultaat van het model dat is opgezet op basis van daggemiddelde waterstanden en daggemiddelde waarden voor de verschillende modelcomponenten. Dit model wordt beschreven door vergelijking (7).

De bijlage bevat per station drie typen figuren:

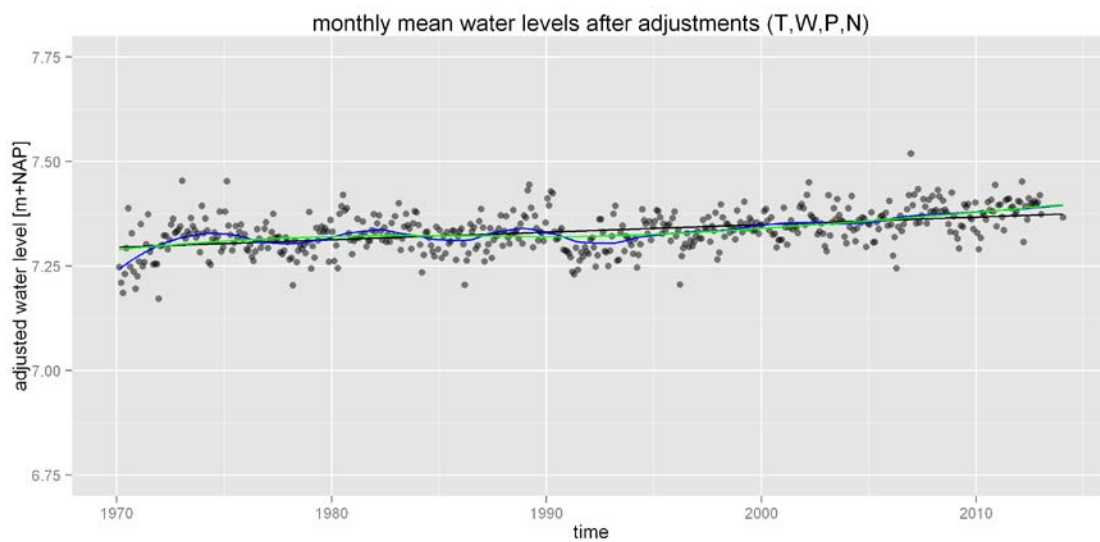
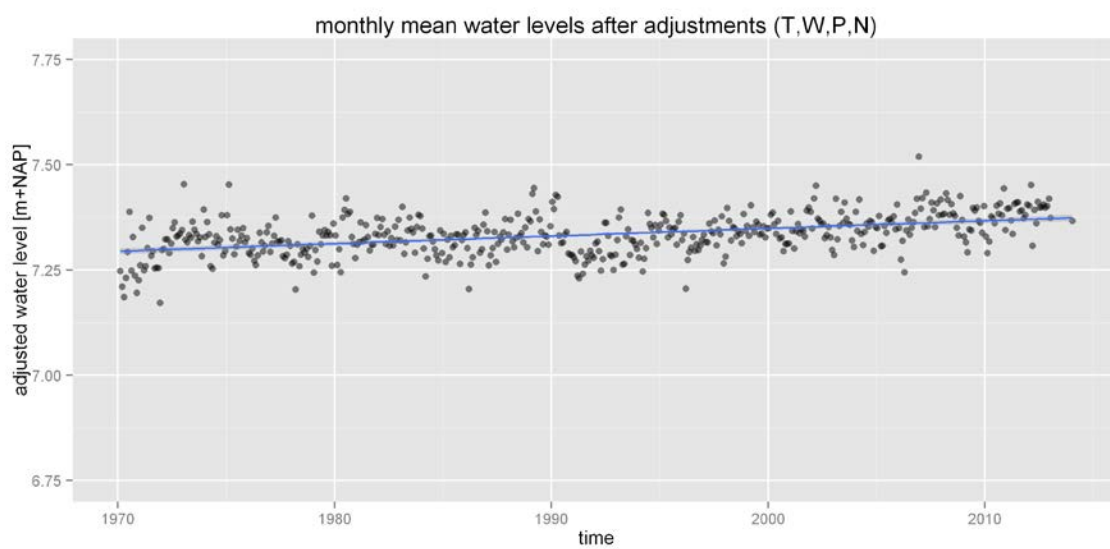
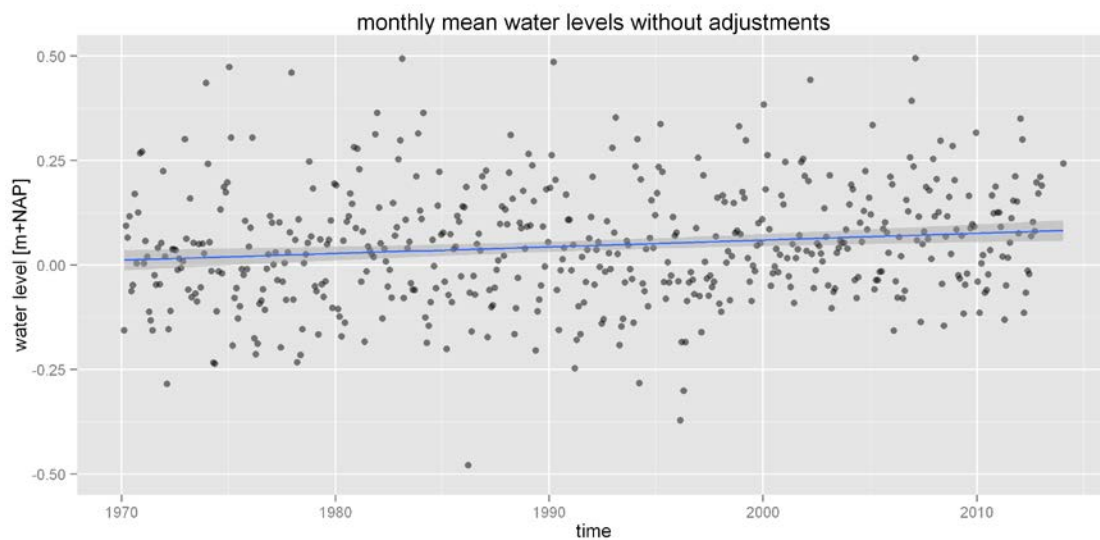
1. De gemeten waterstanden met het resultaat van een lineaire regressie.
2. De waterstanden na correctie voor het effect van het harmonisch getij, wind, luchtdruk en de nodale cyclus, inclusief het resultaat van een lineaire regressie.
3. Dezelfde figuren als onder (2), maar dan met toevoeging van lokale regressie (LOESS methode) met een bandbreedte van 0,25 (blauw) of 0,75 (groen). De bandbreedte indiceert het deel van de data dat gebruikt wordt bij de lokale regressie. De lineaire regressielijn is in deze figuren in zwart aanwezig.

Alle waterstanden zijn (indien van toepassing na correctie) gemiddeld per maand ten behoeve van de leesbaarheid.

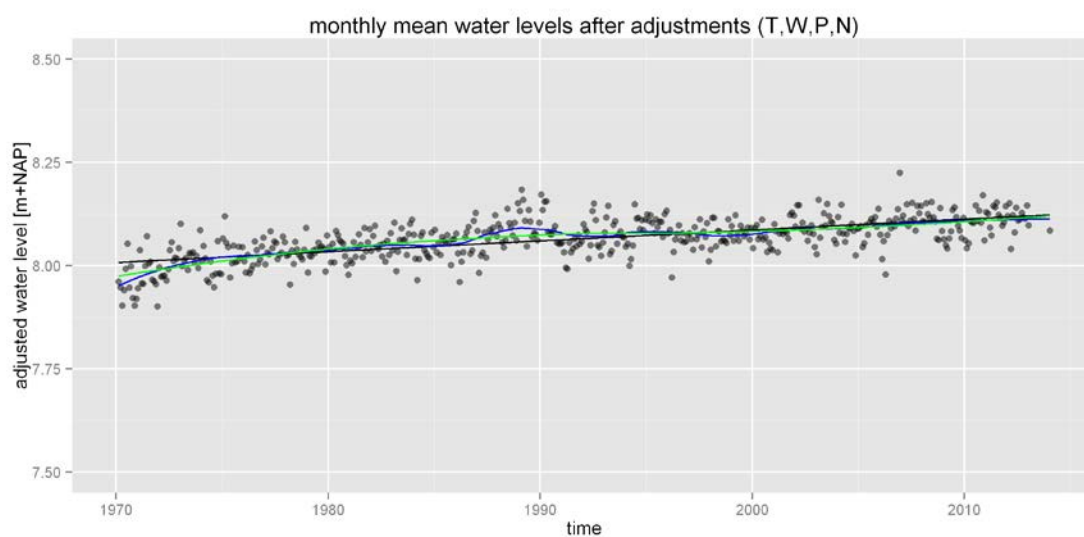
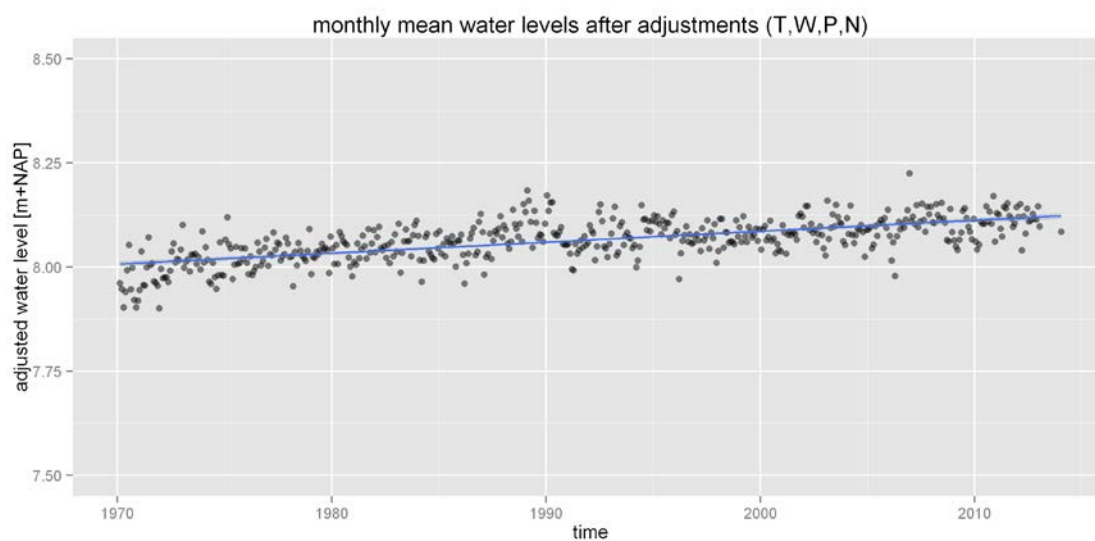
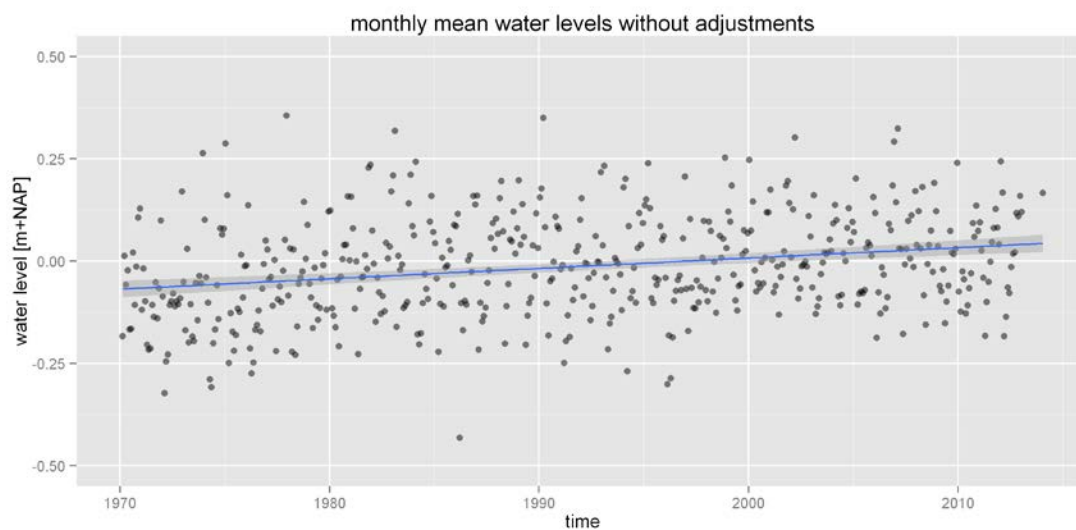
Delfzijl



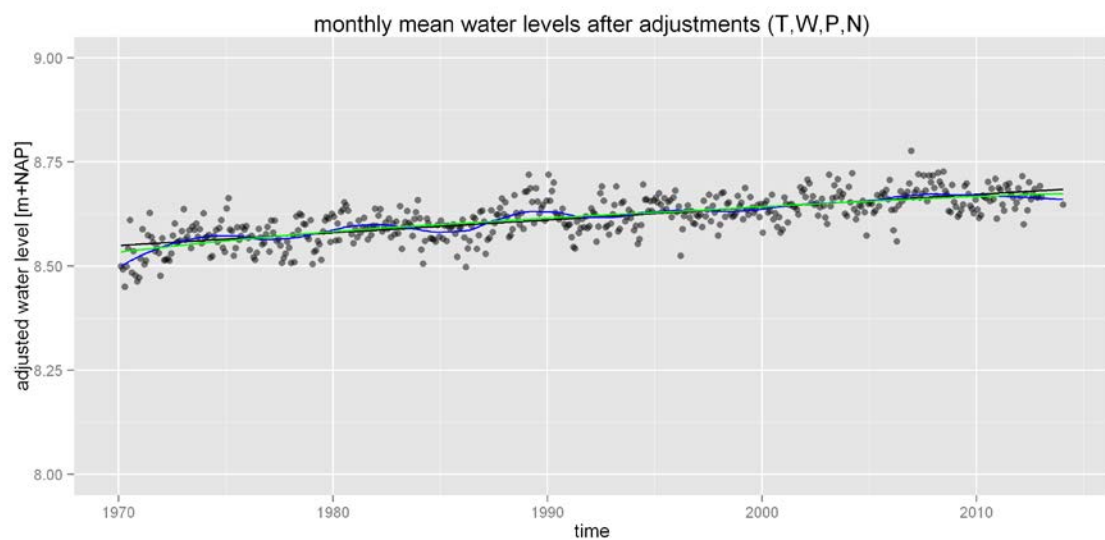
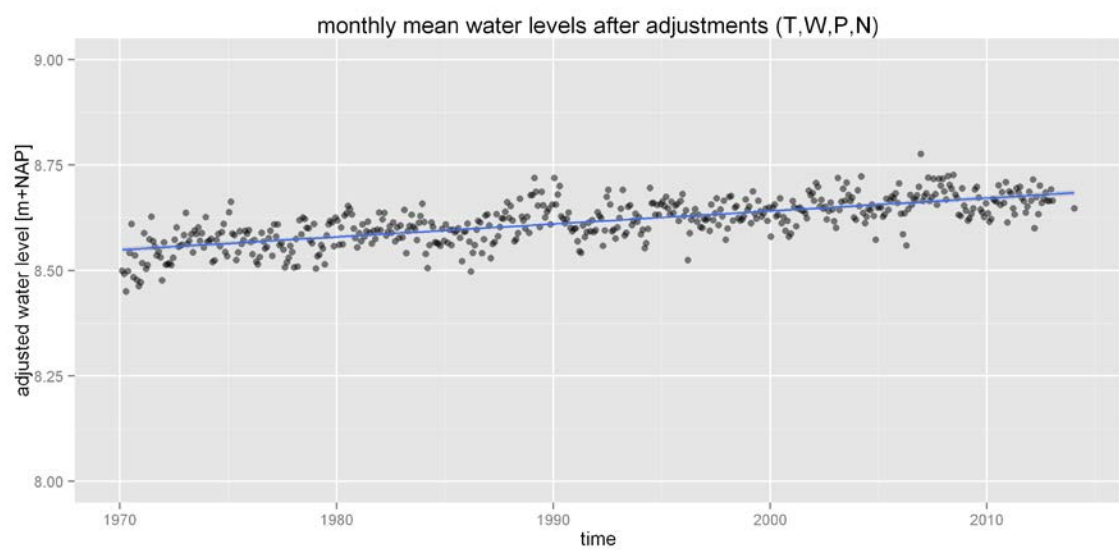
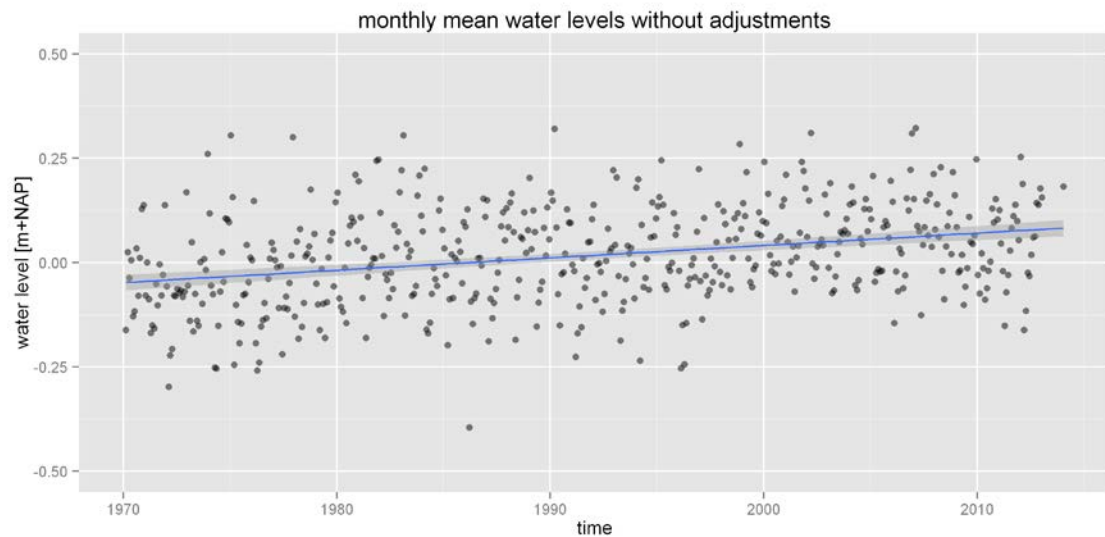
Harlingen



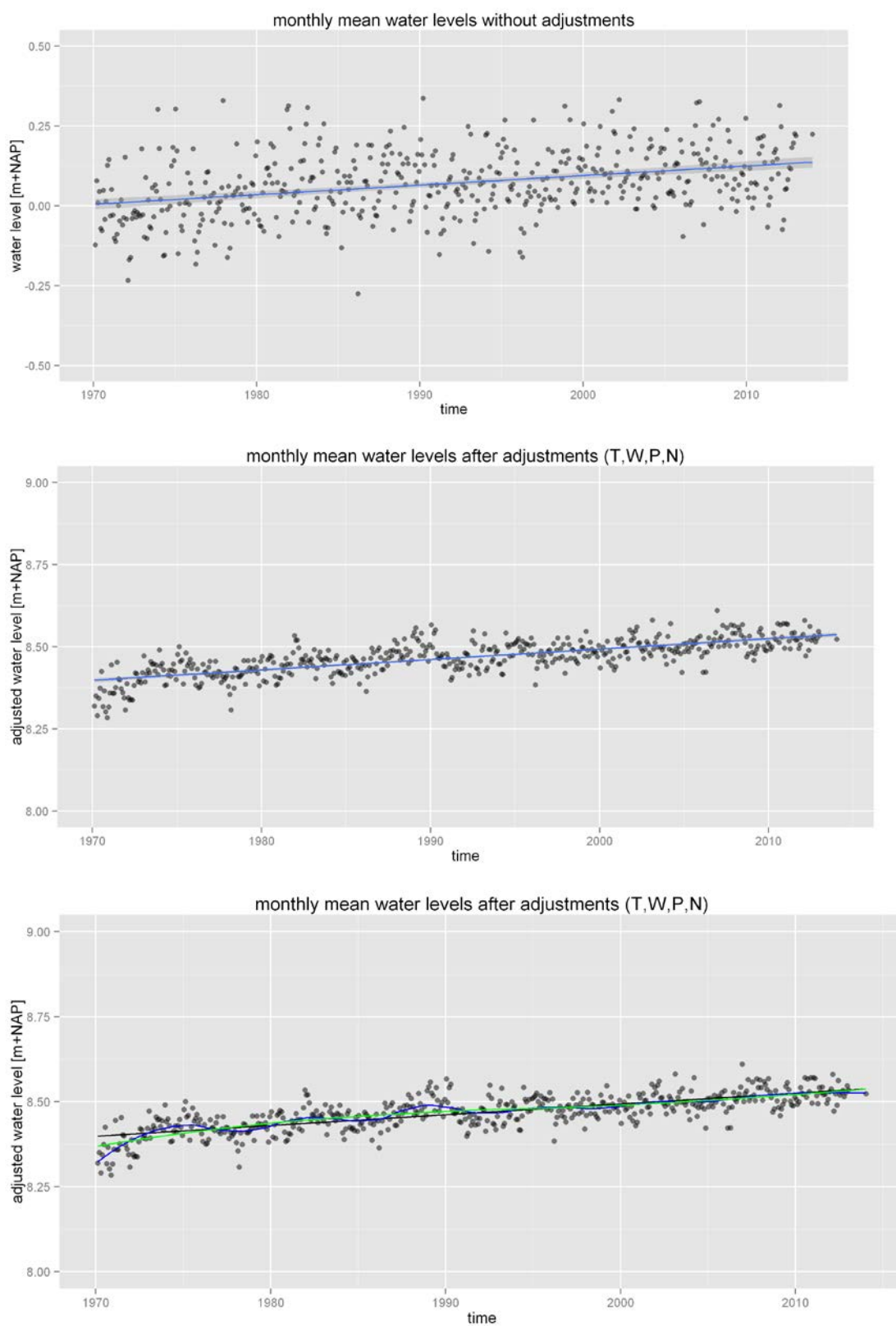
Den Helder

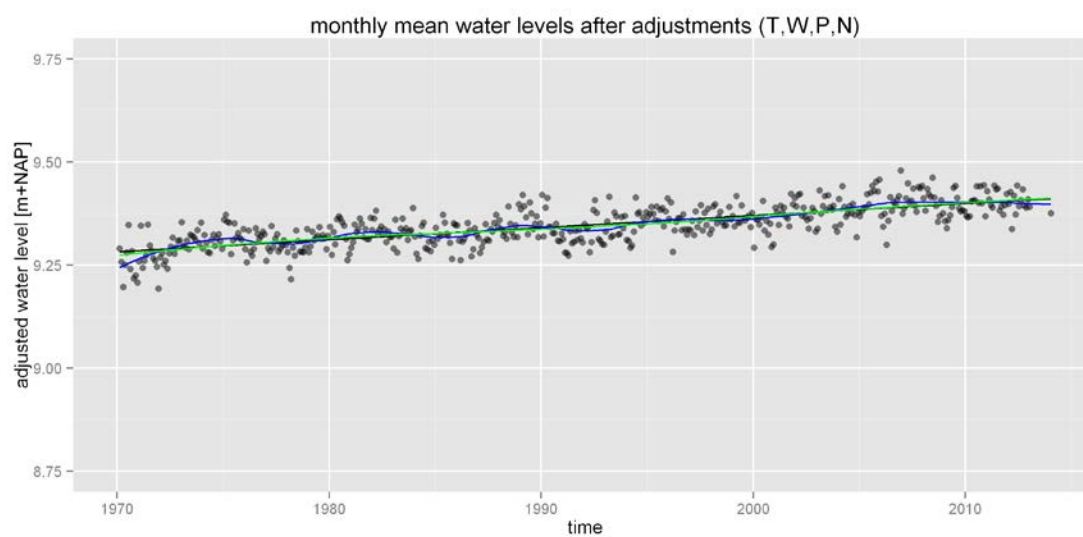
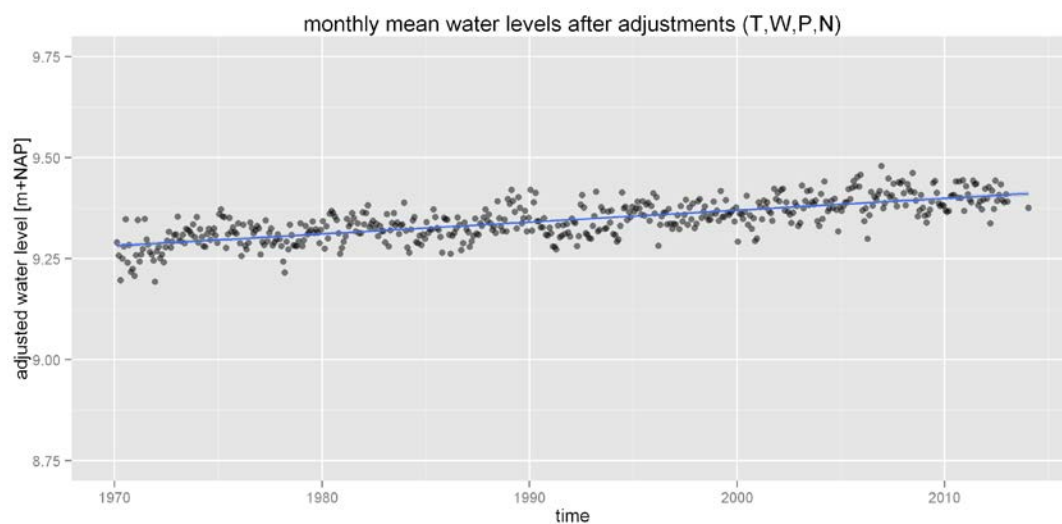
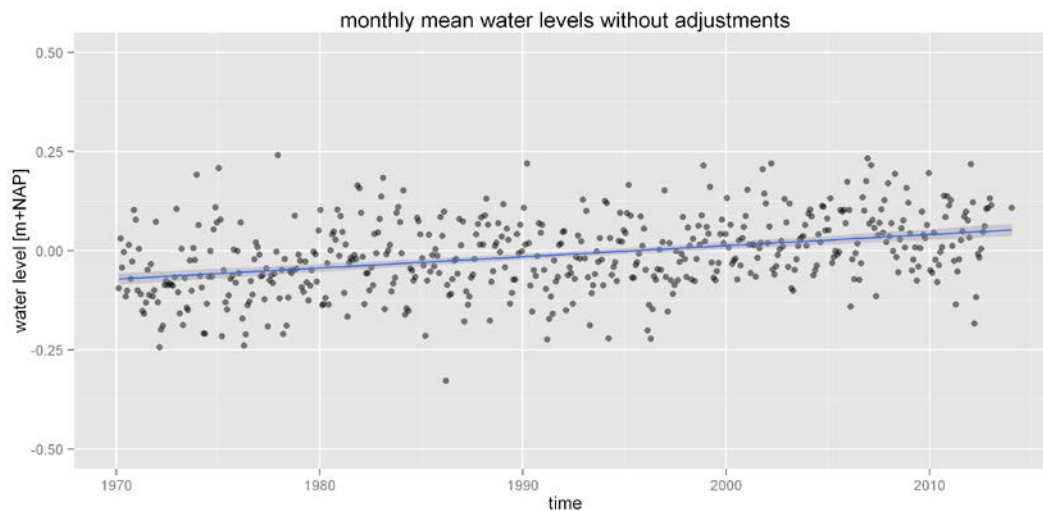


IJmuiden

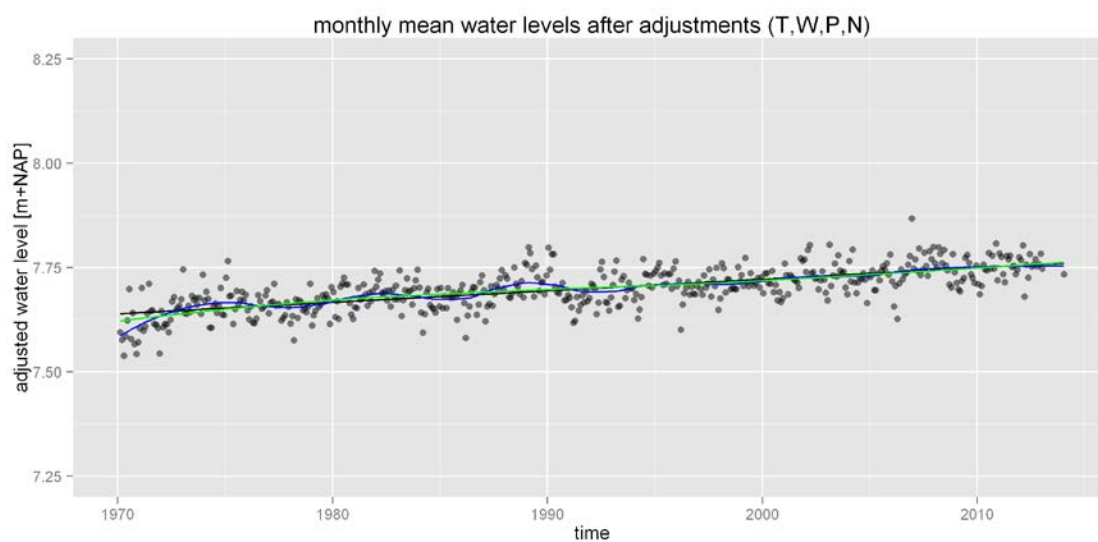
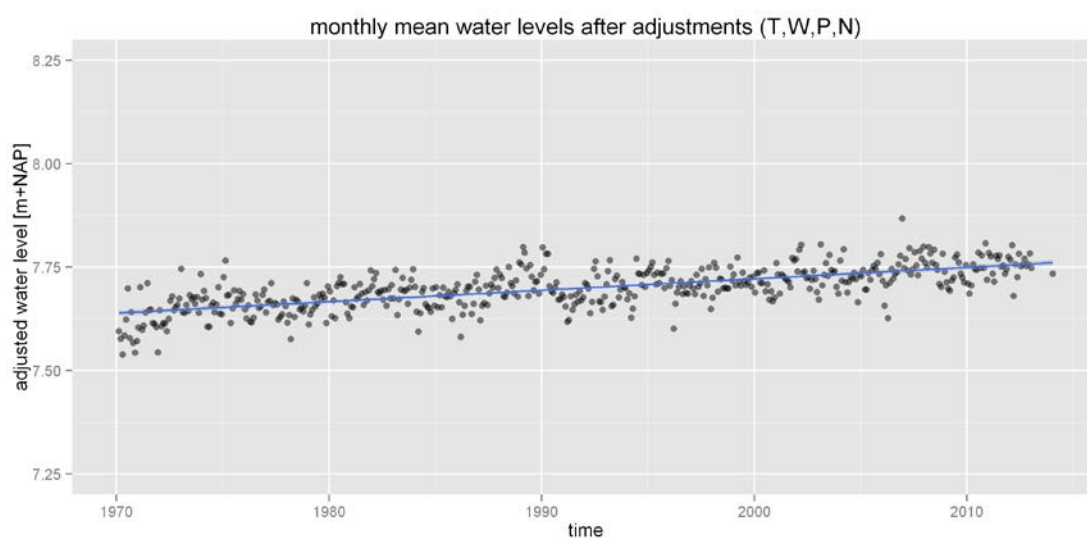
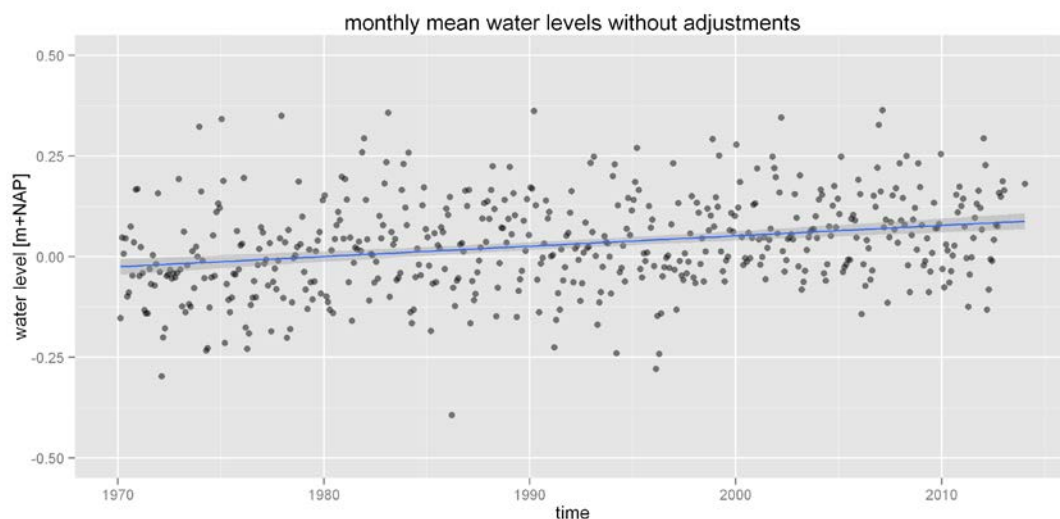


Hoek van Holland



Vlissingen

Gemiddeld



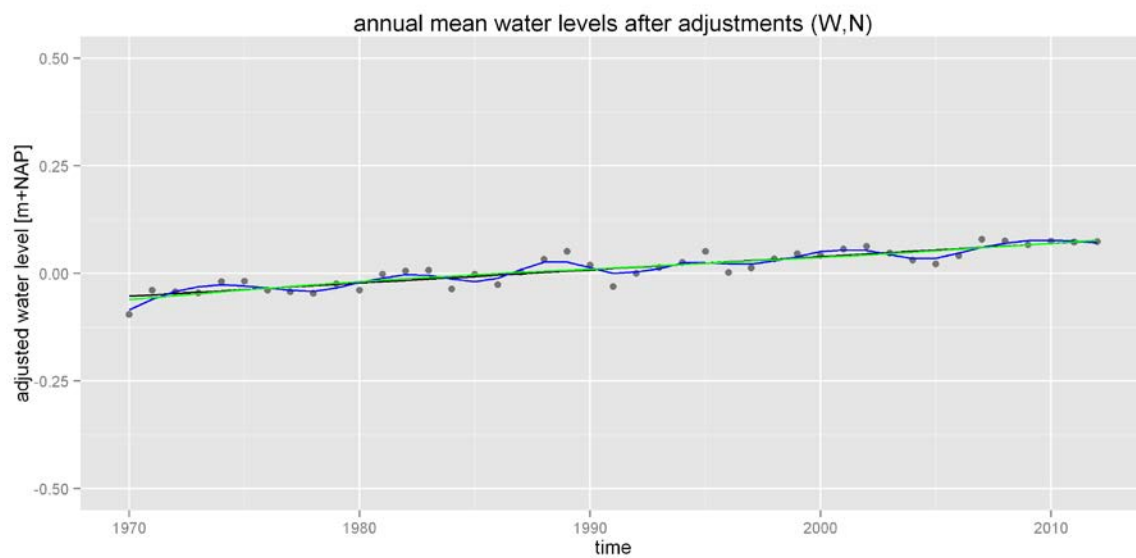
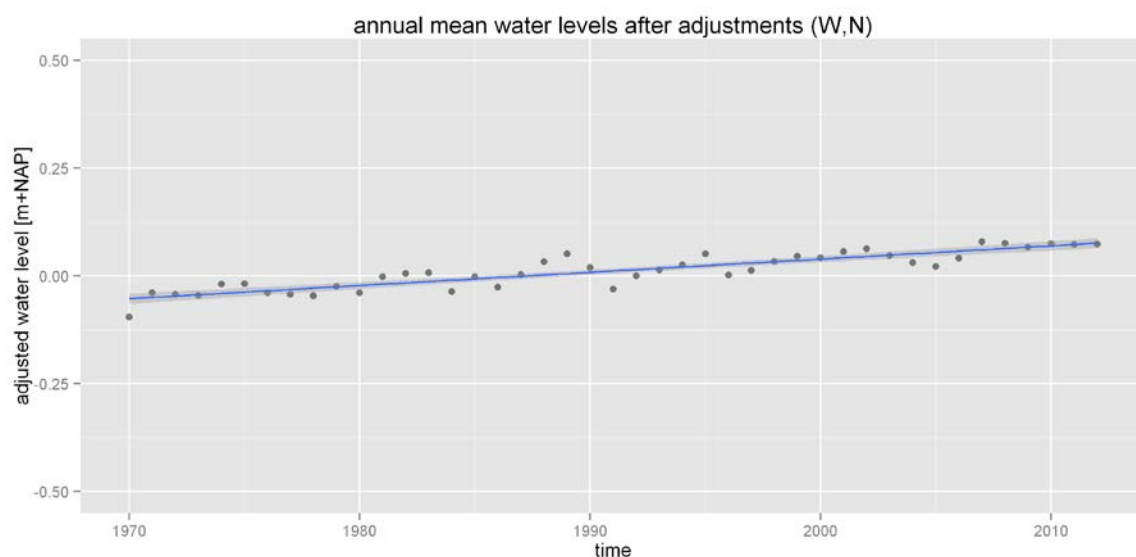
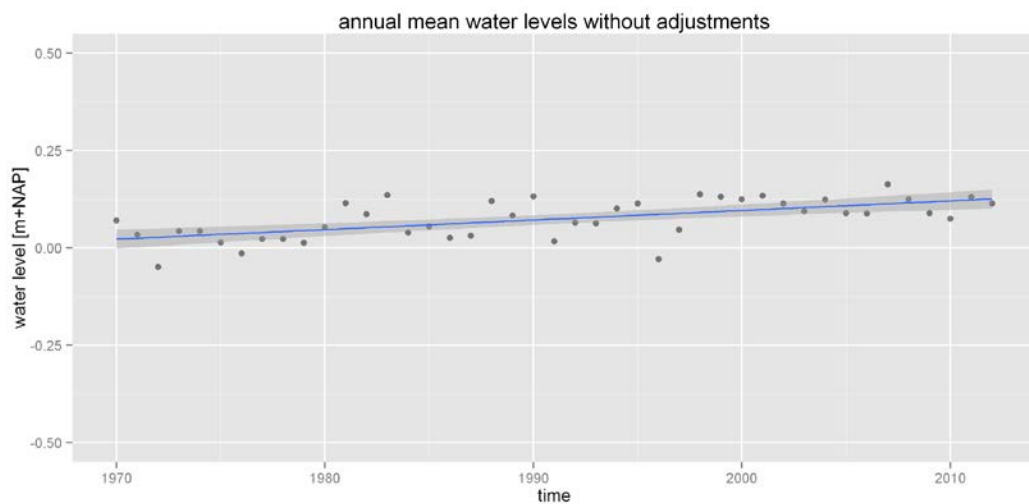
E Figuren o.b.v. jaargemiddelden

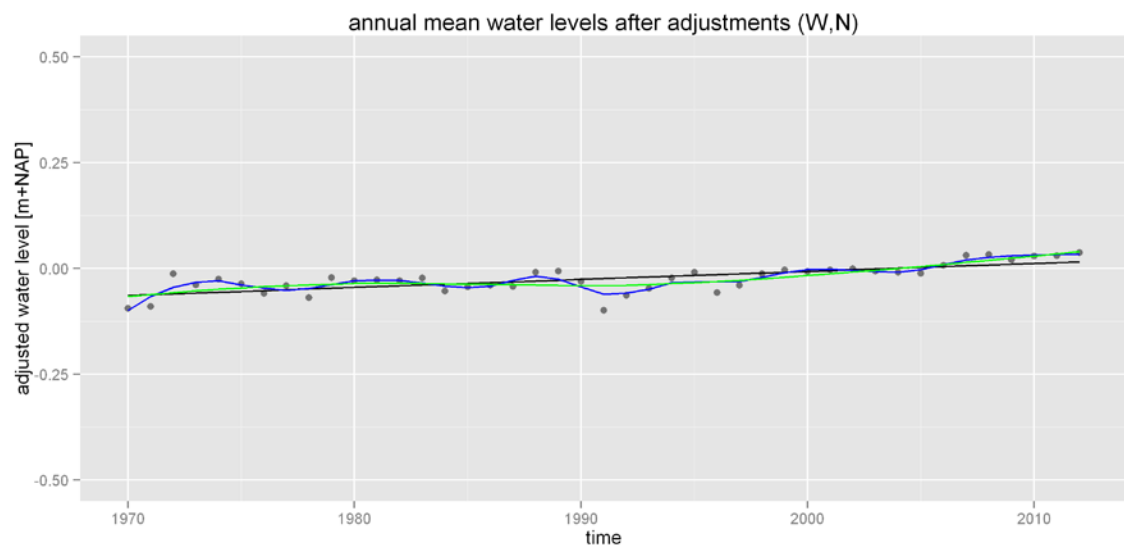
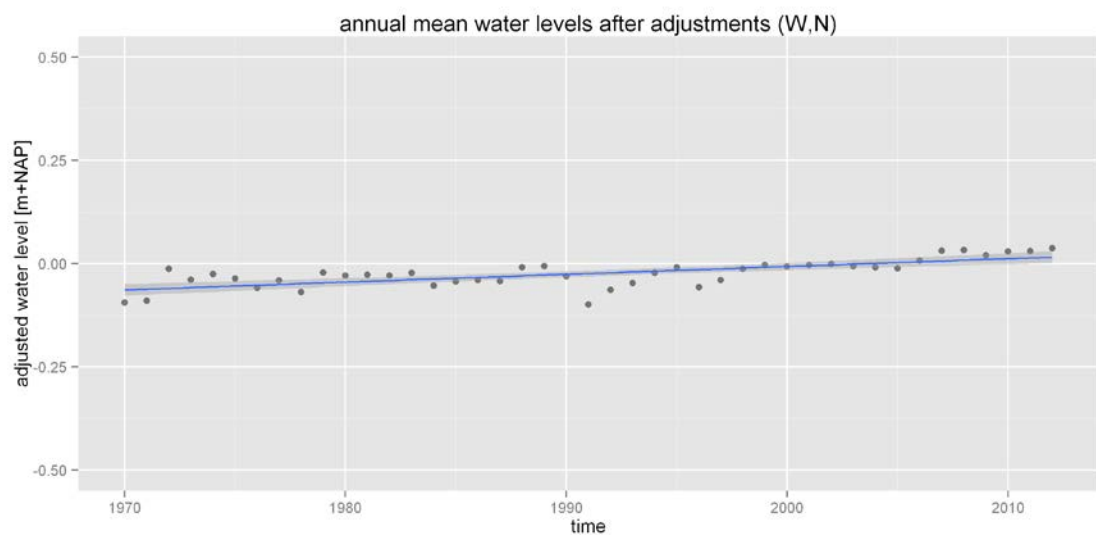
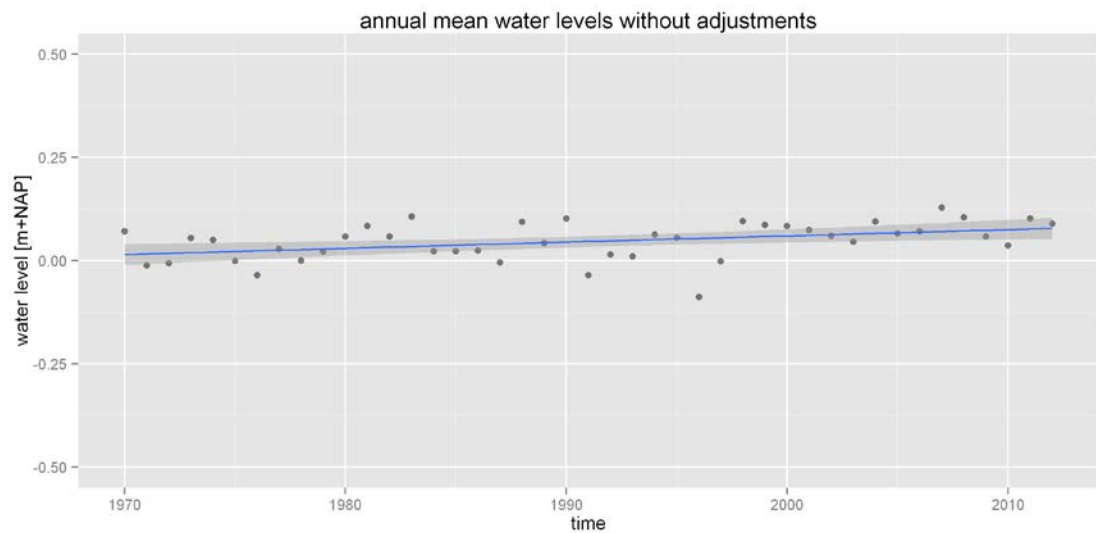
Deze bijlage geeft een weergave van het resultaat van het model dat is opgezet op basis van jaargemiddelde waterstanden en jaargemiddelde waarden voor de verschillende modelcomponenten. Dit model wordt beschreven door vergelijking (3).

De bijlage bevat per station drie typen figuren:

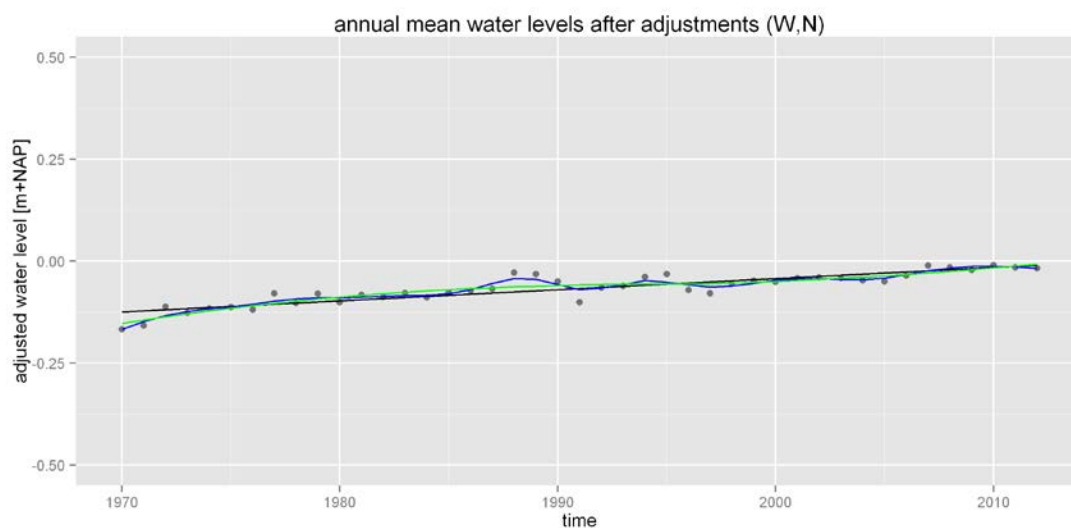
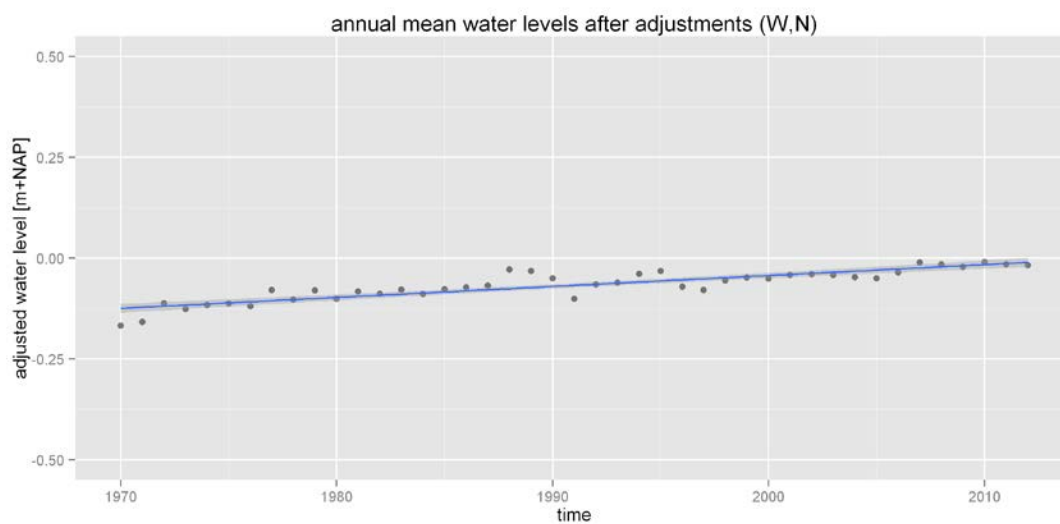
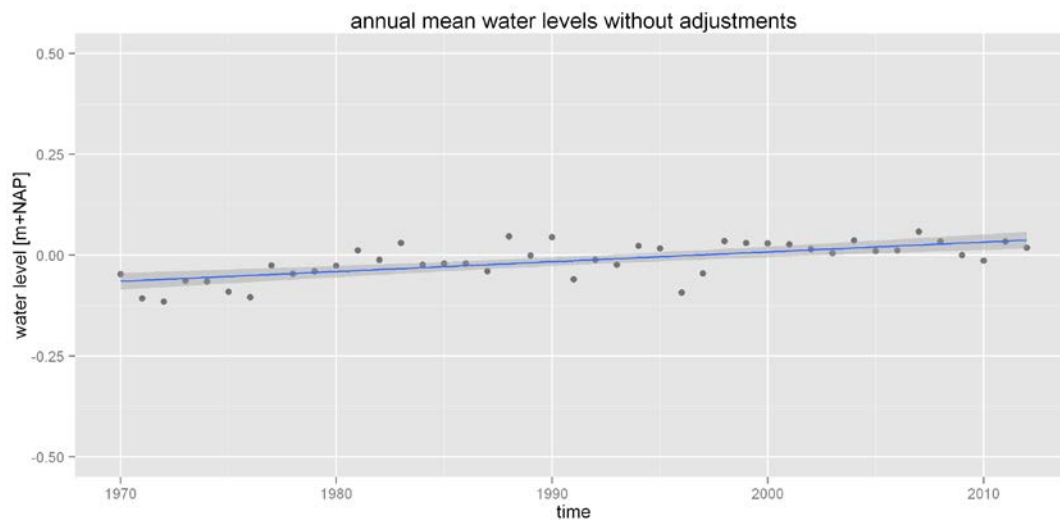
1. De gemeten waterstanden met het resultaat van een lineaire regressie.
2. De waterstanden na correctie voor het effect van het harmonisch getij, wind, luchtdruk en de nodale cyclus, inclusief het resultaat van een lineaire regressie.
3. Dezelfde figuren als onder (2), maar dan met toevoeging van lokale regressie (LOESS methode) met een bandbreedte van 0,25 (blauw) of 0,75 (groen). De bandbreedte indiceert het deel van de data dat gebruikt wordt bij de lokale regressie. De lineaire regressielijn is in deze figuren in zwart aanwezig.

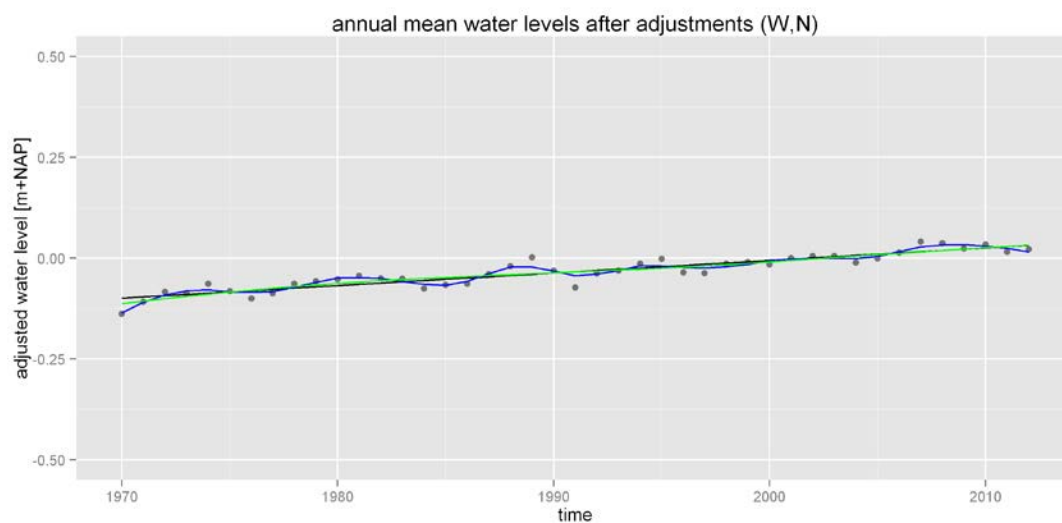
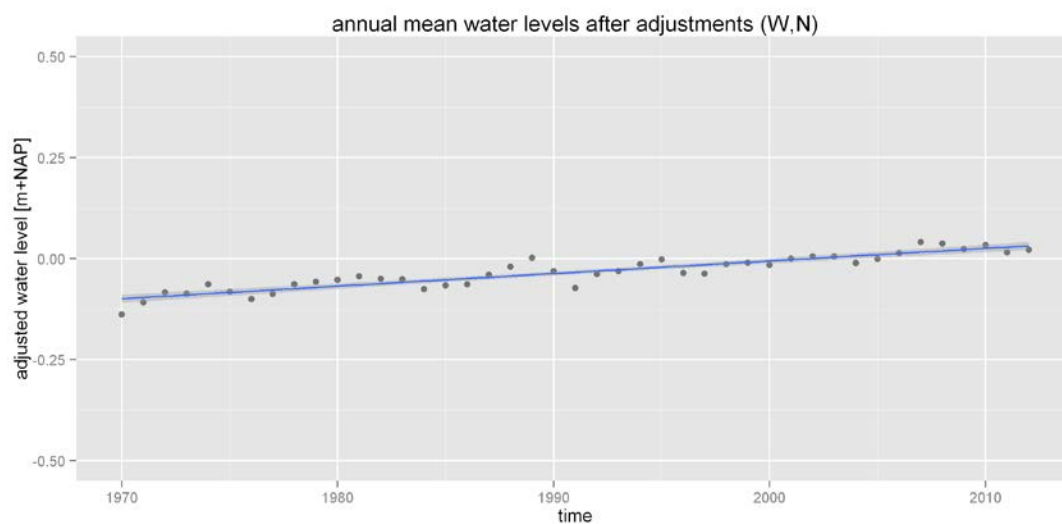
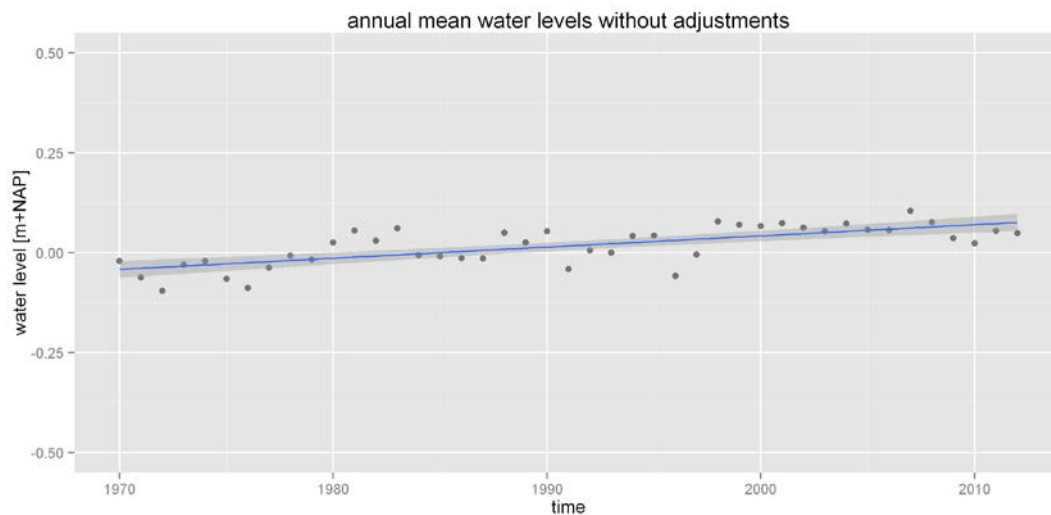
Delfzijl



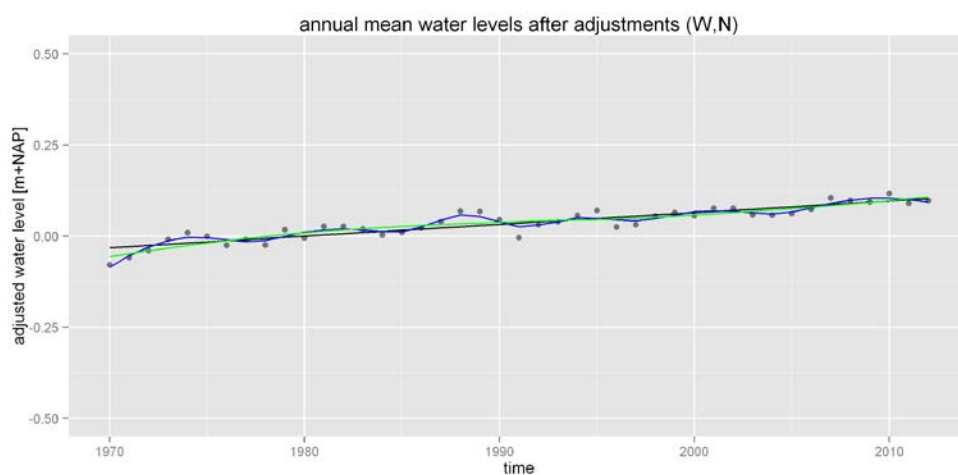
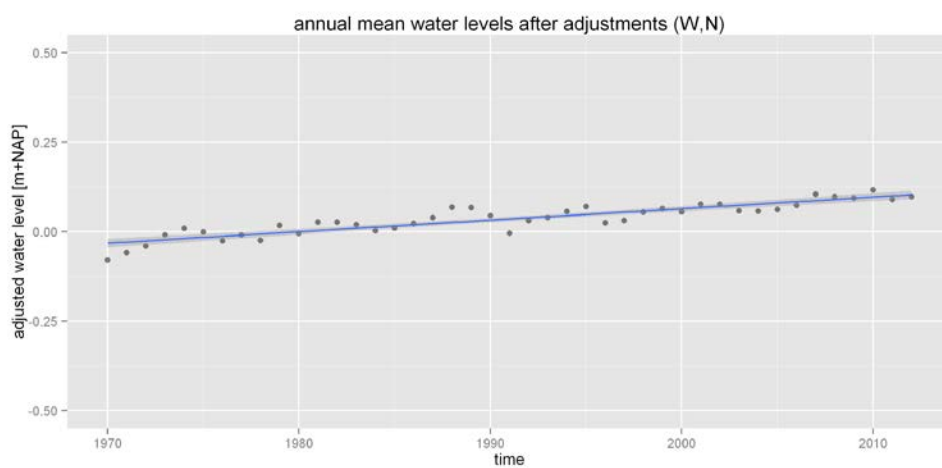
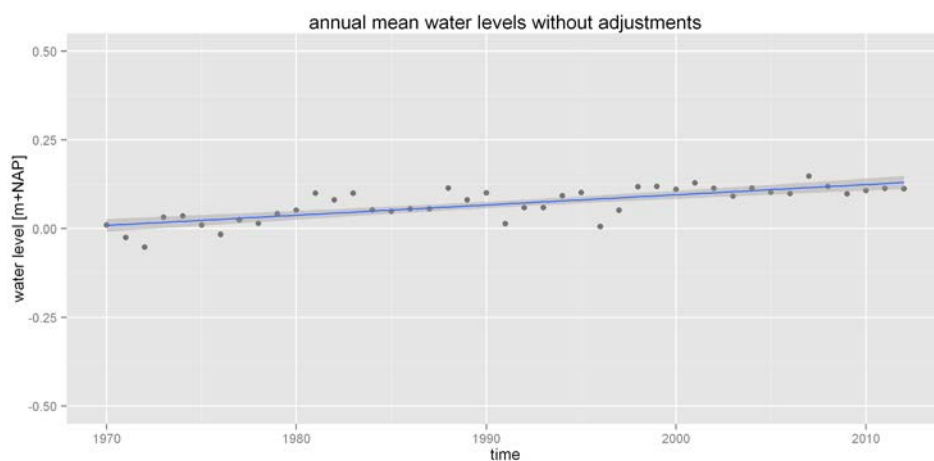
Harlingen

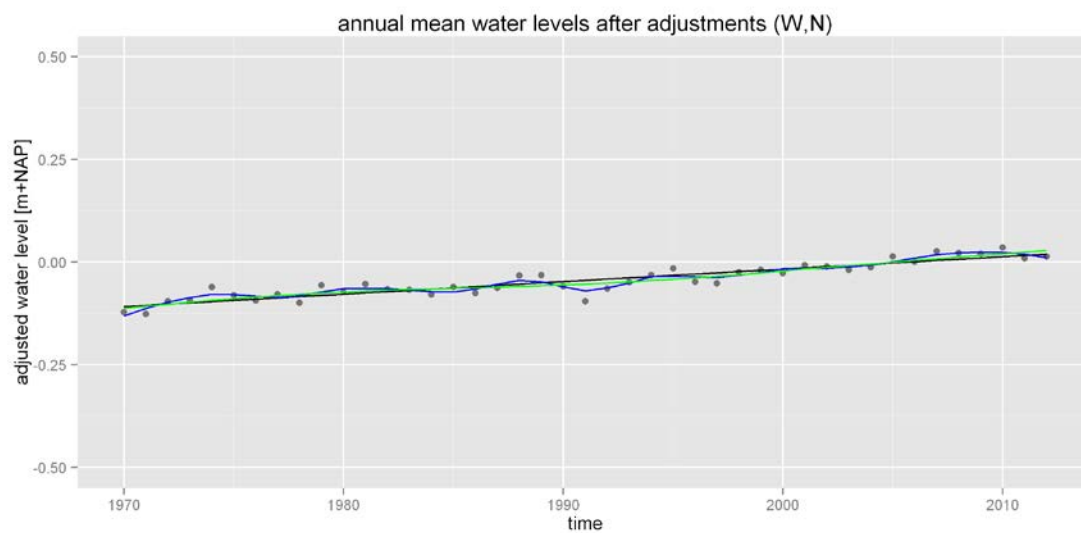
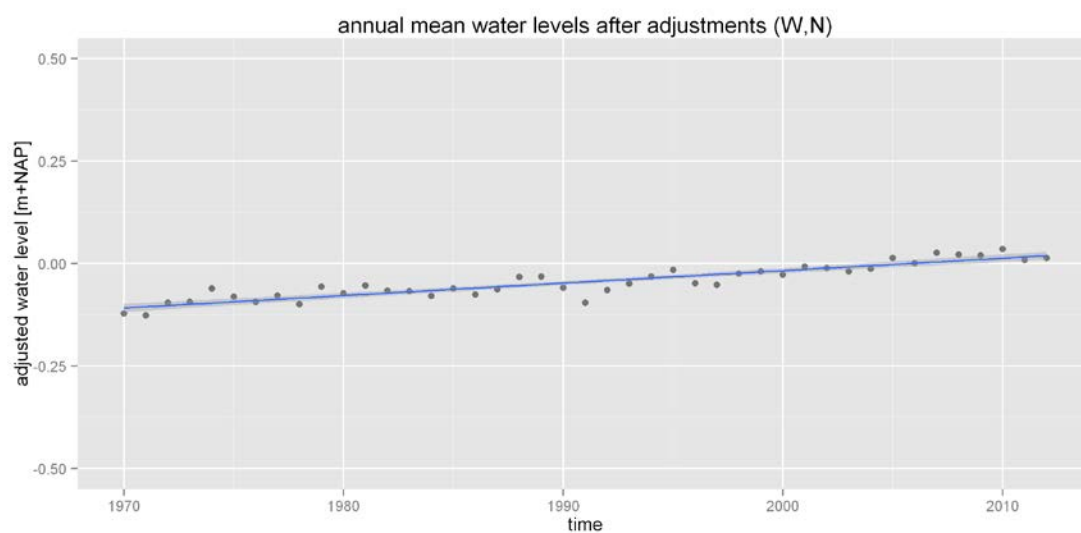
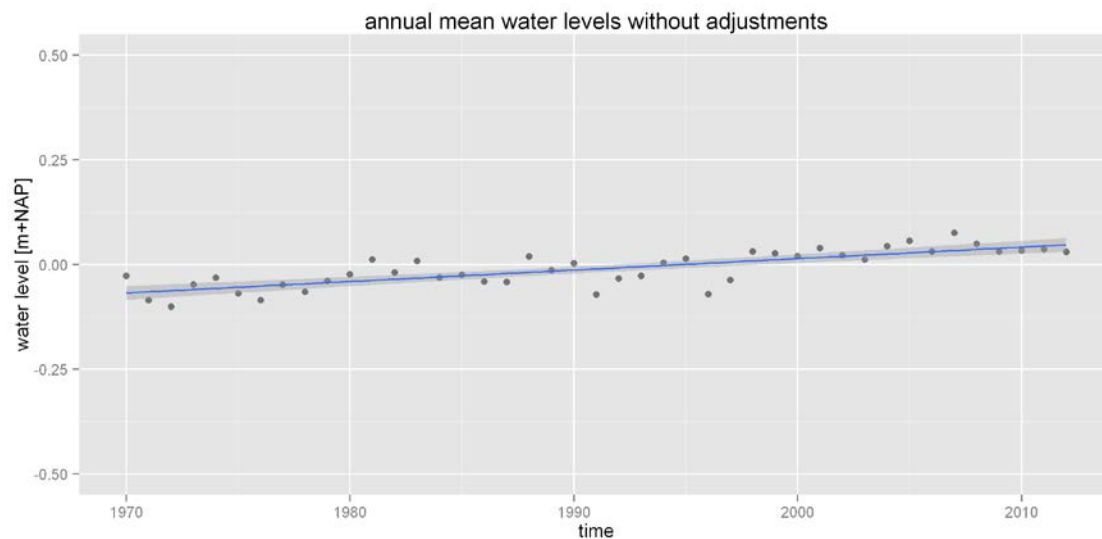
Den Helder



IJmuiden

Hoek van Holland



Vlissingen

Gemiddeld

